

**FACHSCHUL –
FERNSTUDIUM**

Prof. Dr. sc. techn. Werner Richter

M E S S – S Y S T E M E

2.00

Einführung

Herausgeber:

**Institut für Fachschulwesen der
Deutschen Demokratischen Republik**

Karl-Marx-Stadt

03 1677 20 0

Verfasser:

Prof. Dr. sc. techn. Werner R i c h t e r
Technische Hochschule Leipzig

Lektoren:

Ing. Arthur B e c k e r
Ingenieurschule für Elektrotechnik und Maschinenbau Eisleben
Dipl.-Ing. Gerd R i t t n e r
Ingenieurschule für Elektrotechnik „Hanno Günther“
Velten-Hohenschöpping

Bearbeiter:

FSD Dipl.-Ing. Günter H e l m
Institut für Fachschulwesen der DDR
Karl-Marx-Stadt

Redaktionsschluß: 4. 9. 1978

Als Manuskript gedruckt · Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlicht:

**INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
Karl-Marx-Stadt**

Druck:

**ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU**

Ag 613/301/84/750

1. Ausgabe

5. Auflage

Vorzugsschutzgebühr: 1,00 M

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Bauglieder in Meßeinrichtungen	7
2. Grundstrukturen	15
2.1. Reihenstruktur	16
2.2. Kreisstruktur	16
2.3. Parallelstruktur	17
3. Einheitssysteme	19
Lösungen der Aufgaben und Übungen	23
Literaturverzeichnis	24
Sachwortverzeichnis	4
Verzeichnis der Kurzzeichen	4

Sachwortverzeichnis

Abbildungsgröße 9 f.
Anschlußparameter 19
Bauglied 9
Beschreibung, mathematische 10
Busstruktur 20
Bussystem 19
Differentialgeber 17
Einheit, universell nutzbare 19
Einheitssystem 19, 21
Grundfunktion 19
Hilfsfunktion 19
Kettenschaltung 15
Kettenstruktur 20
Kreisstruktur 16
Netzstruktur 20
Meßfühler 8, 19
Meßgröße 7, 9 f.
Meßsignal 7
Meßwandler 8, 19
Parallelstruktur 17
Prinzip, physikalisches 10
Reihenstruktur 16
Ringsstruktur 20
Rückführung 15
Schnittstelle 19
Signalflußbild 9
Standard-Interface 19
Störgröße 8
Störkompensation 18
System, geschlossenes 15
System, mit Rückführung 15
System, offenes 15

Systemlösung 19
Übertragungsfaktor 8

Verzeichnis der Kurzzeichen

K Übertragungsfaktor
R Widerstand
s Weg
U Spannung
x unabhängige Variable, Meßgröße
y abhängige Variable, Ausgangsgröße
z Störgröße

Vorbemerkungen

Der vorliegende Lehrmaterialbaustein wurde zur Einführung in den Abschnitt Meßsysteme des Lehrgebietes Meß- und Prüftechnik der Grundstudienrichtung Elektroingenieurwesen ausgearbeitet. Sein Inhalt baut auf dem des Lehrmaterialbausteins zur Einführung in die Meß- und Prüftechnik [1] auf. Er entspricht den Anforderungen der drei Fachrichtungsgruppen des Elektroingenieurwesens: Elektronik, Elektrotechnik und Automatisierungstechnik. Im vorliegenden Lehrmaterialbaustein werden Kenntnisse über Bauglieder, Grundstrukturen und Einheitssysteme vermittelt, die als Grundlage für das Studium der Meßsysteme zur Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen in allen Fachrichtungen des Elektroingenieurwesens erforderlich sind.

Der Inhalt des vorliegenden Lehrmaterialbausteins ist dementsprechend unter Berücksichtigung der Anforderungen der Fachrichtungen mit dem Inhalt nachfolgender Bausteine (s.[3] bis [8] bzw. [9] und [10] und weitere in [1] angegebene Bausteine) abgestimmt.

1. Bauglieder in Meßeinrichtungen

Im Lehrmaterialbaustein „Einführung in die Meß- und Prüftechnik“ [1], Abschnitt 3.1., wurde im Zusammenhang mit der Erläuterung der Meßgrößen und Meßsignale schon die Grundstruktur einer Meßeinrichtung erklärt. Sie besteht im einfachsten Fall aus einem einzigen Bauglied, das nur je einen Ein- und Ausgang hat (Bild 1.1 a).

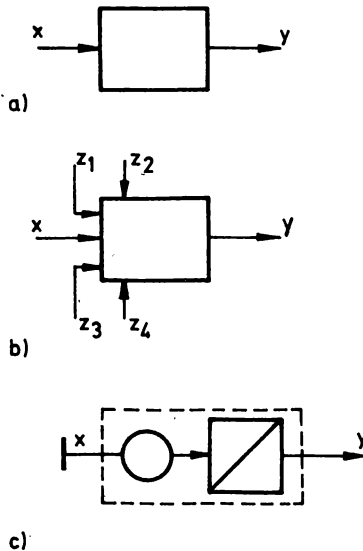


Bild 1.1: Blockdarstellung einer Meßeinrichtung

- a) ideal;
- b) real unter dem Einfluß von Störgrößen;
- c) Meßfühler und Meßwandler getrennt

Jedes Meßmittel, ob ein Schülerlineal oder ein kompliziertes Meßsystem, kann so dargestellt werden. In letzterem Fall ist verständlicherweise schon weitgehend aggregiert worden, etwa unter dem Aspekt, daß dieses Meßsystem Bestandteil einer komplexen Produktionsanlage ist, zu deren Überwachung eben nur die Zuordnung des Ausgangssignals y zur Meßgröße x benötigt wird, ohne die interne Feinstruktur des Meßsystems kennen zu müssen. Den Meßtechniker dagegen interessiert gerade diese Feinstruktur, da seine Aufgabe ja sein kann, eine noch bessere (damit kann gemeint sein: eine noch schnellere, genauere, ökonomischere ...) Lösung zu entwerfen und zu realisieren (siehe Abschnitt 1.2.).

Ebenfalls in [1], Abschnitt 5.3., wurde schon darauf hingewiesen, daß reale Meßeinrichtungen noch weiteren Größen unterliegen, die – im Unterschied zur gewünschten Beeinflußbarkeit der Meßeinrichtung durch die Meßgröße x – als Störgrößen auf die Meßeinrichtungen wirken und ihrerseits unerwünschte Reaktionen des Ausgangssignals hervorrufen (im Bild 1.1 b sind einige Störgrößen eingezeichnet).

Für genauere Analysen (und natürlich auch Synthesen) von Meßeinrichtungen reicht die einfache Blockdarstellung des Bildes 1.1 nicht aus; das Meßsystem muß weiter „aufgelöst“, d. h. in seine einzelnen Bestandteile zerlegt werden, deren Zusammenwirken zu untersuchen ist. Bild 1.1 c ist der nächste Schritt in dieser Richtung: die Aufteilung der Meßeinrichtung in *Meßfühler* und *Meßwandler*.

Die Definitionen wurden in [1], Abschnitt 3.1. und Tafel 3.2., bereits genannt. Zur Veranschaulichung soll hier ein Beispiel wiederholt und weiter ausgebaut werden.

Beispiel:

Eine Druckmeßeinrichtung bestehe aus einem Plattenfedermanometer, dessen Membranhub über Winkelhebel an einem Potentiometer in eine Widerstandsänderung und durch Anlegen einer Hilfsspannung auf eine Gleichspannung U_1 abgebildet wird (Bild 1.2).

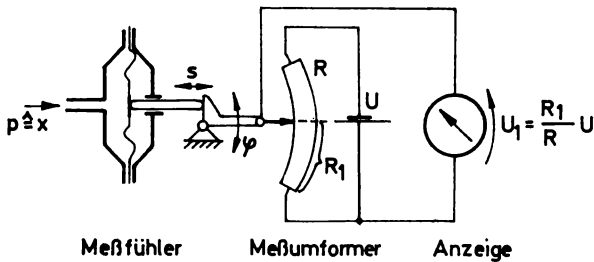


Bild 1.2: Bauglieder einer Druckmeßeinrichtung

Hier kann nun leicht getrennt werden: Meßfühler ist die Plattenfeder, das natürliche Abbildungssignal Weg ($= s$) gelangt zum Meßwandler, der dieses Abbildungssignal über weitere Wandlungsvorgänge auf die Gleichspannung als Ausgangssignal abbildet.

Zur vollständigen Darstellung muß aber jedes einzelne Wandlungsglied mit seiner Ein- und Ausgangsgröße angegeben und auch der jeweilige Übertragungsfaktor genannt werden, wie Bild 1.3 zeigt.

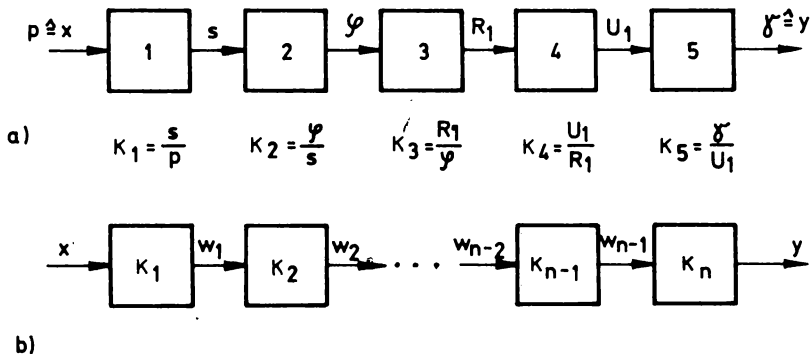


Bild 1.3: Signalflußbild zu Bild 1.2

a) ausführlich;

b) unter Verwendung allgemeiner Symbole

1 Membranfeder, 2 Winkelhebel, 3 veränderter Widerstand,

4 Meßschaltung, 5 Anzeigegerät

Dabei ist das Anzeigegerät als ein Bauglied dargestellt, das seinerseits wieder aus vier Funktionen besteht (siehe [3]).

Bei gleicher Struktur und allgemeiner Beschreibung (Bild 1.3 b) wird deutlich, daß der Gesamtübertragungsfaktor das Produkt der einzelnen Übertragungsfaktoren ist:

$$y = x \cdot \prod_{i=1}^n K_i \quad ; \quad B_{\text{ges}} = \prod_{i=1}^n K_i \quad (1.1)$$

Der Nutzen solcher Überlegungen besteht in der Erkenntnis, daß in der üblichen Blockdarstellung die tatsächliche Feinstruktur einer Meßeinrichtung nicht erkennbar wird (und nicht unbedingt auch erkennbar sein muß). Grund dafür ist immer in der Zielstellung zu suchen, wofür die Darstellung dienen soll: der Anwender wird im allgemeinen mit „gröberen“ Strukturdarstellungen umgehen als der Entwickler und Technologie in der Meßgeräteindustrie.

Als *Bauglieder* können nun praktisch alle denkbaren physikalisch-technischen Konfigurationen auftreten, die einen festen Zusammenhang zwischen zwei Größen herstellen, wovon eine die Meßgröße und die andere die Abbildungs-(Ausgangs-)größe ist. Diese Erkenntnis ist im ersten Moment überraschend, denn die Zahl der heute bekannten Zusammenhänge und Effekte ist beträchtlich (Größenordnung 10^3), so daß eine Übersicht kaum möglich erscheint.

Beispiel:

Es soll die Zahl der Verknüpfungen wesentlicher Energieformen ermittelt werden. Die mechanische, elektrische, magnetische, pneumatische, thermische, optische, chemische und nukleare Energie sollen jeweils am Eingang, am Ausgang und als Hilfsenergie genutzt werden; es gäbe also mindestens $8^3 = 512$ Kombinationen (die unterschiedlichen Wertebereiche nicht gerechnet).

Auch eine Betrachtung der Informationsparameter an Ein- und Ausgang ist unbefriedigend.

Beispiel:

Für elektrische Signale können als Informationsparameter wirken: Gleichstrom- oder Gleichspannungsamplitude; Amplitude, Frequenz und Nullphasenwinkel bei Wechselstrom und -spannung; für Pulssignale PAM, PFM, PPM, PLM, PCM. Das sind allein $13^2 = 169$ Kombinationen der Informationsparameter.

Sinnvoll ist deshalb nur eine zweckgerichtete Einteilung der möglichen Wandlungsglieder, weil bei weitem nicht alle bekannten Effekte und Zusammenhänge meßtechnisch nutzbar sind. Auch muß berücksichtigt werden, welches Gebiet der Meßtechnik im realen Fall benötigt wird (in der Längenmeßtechnik sind z. B. physio-chemische Gesetzmäßigkeiten bestenfalls Störfaktoren, für die zu bearbeitenden Meßprobleme aber nicht relevant).

Häufig wird die Einteilung von Baugliedern und auch Meßeinrichtungen in Richtung

- a) der Meßgröße (also Messung von Temperatur, Spannung, Druck . . .) ,
- b) der Abbildungsgröße (wesentlich für Einheitssysteme, siehe Abschnitt 1.3.) ,
- c) des physikalischen Prinzips und
- d) der mathematischen Beschreibung

vorgenommen.

Die Möglichkeit d) führt wieder auf die Systemtheorie, während bei Verfolgung jeweils nur einer der unter a) bis c) genannten Richtungen Wiederholungen unvermeidbar sind. Zweckmäßig sind deshalb Mischformen, die mehrere Aspekte miteinander verknüpfen.

In Tafel 1.1 ist das in der Form geschehen, daß Wandlungsglieder in Meßeinrichtungen in eine Matrix eingetragen sind, deren Zeilen und Spalten physikalische Größen bedeuten.

Die „unbesetzten“ Kreuzungspunkte sind entweder nicht üblich bzw. es gibt keine Effekte, die die Verknüpfung herstellen. Bei genauer Betrachtung zeigen sich zwei interessante Tendenzen:

- auf die mechanische Abbildungsgröße Weg oder Wegänderung lassen sich relativ viele Größen abbilden. Gleiches gilt für die Kraft und den Winkel bzw. die Winkeländerung als weitere mechanische Abbildungsgrößen;
- häufigste elektrische Abbildungsgröße ist die Spannung.

In den weiteren Lehrmaterialbausteinen (siehe [3] bis [8] oder [9] und [10] werden sich diese Tendenzen bestätigen.

Mechanische Größen tragen sehr oft das natürliche Abbildungssignal, während anschließend ebenso häufig auf elektrische Signale übergegangen wird.

Aus Tafel 1.2 sind in etwas anderer Form diese Tendenzen ebenfalls ablesbar. Zur Erläuterung sind Anwendungsbeispiele, vorzugsweise aus der Prozeßmeßtechnik, mit angegeben.

- A 1.1. Warum werden funktionelle Zusammenhänge in Meßeinrichtungen bevorzugt als Signalflußbilder dargestellt?
- A 1.2. Nach welchen Grundsätzen sind die Wandlungsglieder in Tafel 1.2 angeordnet? Nennen Sie Gründe!
- A 1.3. Nennen Sie die häufigsten Abbildungssignale in Meßeinrichtungen!

Tafel I.1.: Beispiele für Meßgrößenwandlung

Wandlung		in															digitales Signal
von		s	v	F	ϕ	M	u	R	L	C	Q	P	T	h	f		
Weg, Wegänderung	s	2		1	2			3,4	5	6					51	61	
Geschwindigkeit	v						7										
Beschleunigung	a	8		8	23						9				51,52		
Kraft	F	1				1									53	62	
Winkel, Winkeländ.	φ	2			2	1		4	5	6							
Winkelgeschwind.	$\dot{\varphi}$			10	24	11	12										
Winkelbeschl.	$\ddot{\varphi}$	-			8	8											
Drehmoment	M			2	1												
Spannung	u				12										54	63	
Strom	i			7	12										63		
Widerstand	R						22								55	63	
Induktivität	L						22								55		
Kapazität	C						22								55		
Ladung	Q						45										
magnet. Fluß	Φ						13										
Druck (-differ.)	p	14		21							9			15	56		
Temperatur	T	16			16		17	18				19			55		
Niveau, Füllstand	h	20								6		14					
Volumenstrom	$\dot{V}$	25		26		32	27					28	29	30	57		
Massestrom	$\dot{m}$					32	31					28					
Menge (Masse)	m	33		35	34										58		
Dichte	ρ	36															
Zähigkeit	η		37			38	40										
Feuchte	ψ							41		44			42,43				

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Erläuterungen:

1	Feder	31	Trägheitsdurchflußmesser
2	Hebel-, Rädergetriebe	32	Flügelrad
3	Dehnungsmessstreifen	33	Federwaage
4	Potentiometer	34	Neigungswaage
5	induktiver Aufnehmer	35	elastische Bauglieder
6	kapazitiver Aufnehmer	36	Auftriebskörper
7	Tauchspule	37	Kugelviskosimeter
8	Feder-Masse-System	38	Rotationsviskosimeter
9	Piezokristall, -keramik	39	Kapillarrisikosimeter
10	Fliehpndel	40	Schwingungviskosimeter
11	Induktionsmeßwerk	41	konduktometrische Verf.
12	bewegl. Leiter im Magnetfeld (Drehspule)	42	Psychrometer
13	Hallgenerator	43	LiCl-Taupunktfühler
14	Federmanometer	44	kapazitiver Feuchtemesser
15	U-Rohr	45	Ladungsverstärker
16	Ausdehnungsthermometer	51	schwingende Saite
17	Thermoelement	52	Biegezug
18	Widerstandsthermometer	53	Impulsgeber
19	Federthermometer	54	Multivibrator
20	Schwimmer	55	Oszillatorschaltung
21	Wellrohr, schlappe Membran	56	Schwingzylinder
22	Brückenschaltung	57	Wirbelkörper
23	schwerer Kreisel	58	Volumen-, Mengenzähler
24	gefesselter Kreisel	61	Kodelineal
25	Schwebekörper	62	Kodescheibe
26	Stauscheibe, Stauklappe	63	Analog-Digital-Umsetzer
27	induktiver Durchflußmesser		
28	Blende, Düse		
29	Thermowiderstand		
30	Überfallwehr		

Tafel 1.2: Wandlungsprinzipien in Meßeinrichtungen

beeinflussende Größe (Eingangsgröße)	beeinflusste Größe (Ausgangsgröße)	physikalischer Effekt oder Zusammenhang	Anwendungsbeispiel
Weg (Winkel)	Weg (Winkel)	Hebelgesetze	
	Kraft, Moment	Elastizitätsgesetze	
	Gas- oder Flüssigkeitsdruck	Strömungsgesetze	Düse-Prallplatte, Strahlrohr
	Ohmscher Widerstand	mechanischer Abgriff bei veränderlichem Widerstand	Potentiometer
		Abhängigkeit d. Widerstands von der Dehnung	Dehnungsmeßstreifen
		Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke	Fotowiderstand, Fotodiode, Fototransistor
	Induktivität	Induktivitätsänderung infolge Luftspalt- oder Kopplungsänderung	induktiver Abnehmer
	Kapazität	Kapazitätsänderung infolge Änderung von Plattenabstand, -fläche oder der Dielektrizitätskonstanten	kapazitiver Abnehmer
Geschwindigkeit	Kraft (Moment)	Fliehkraftwirkung	Fliehpendel (Watt'scher Regulator)
	elektrische Spannung	Induktionsgesetz	Wechselstrom- und Gleichstromgenerator

Tafel 1.2: (Fortsetzung)

Strömungs- geschwindigkeit	Kraft	Strömungsgesetze	Stauscheibe, -klappe, Schwebekörper
	Gas- oder Flüssigkeitsdruck	Durchflußgleichungen (Strömungsgesetze)	Wirkdruckverfahren
Kraft (Moment)	Weg (Winkel)	Elastizitätsgesetze	
	elektrischer Widerstand	Änderung des Übergangswiderstands von Kohleplatten	Kohleldruckgeber (veraltet)
	Induktivität	Abhängigkeit d. Permeabilität vom Spannungszustand	magnetoelastischer Aufnehmer
	elektrische Spannung	Piezoelektrischer Effekt	piezoelektrischer Aufnehmer
Gas- oder Flüssigkeitsdruck	Weg	Elastizitätsgesetze	federelastische Druckmesser
		hydrostatische Gesetze	U-Rohr und Abwandlungen
Temperatur	Weg (Winkel)	Temperaturabhängig- keit von Länge und Volumen	Ausdehnungs- thermometer
	Gas- oder Flüssigkeitsdruck	Temperaturabhängig- keit des Drucks eingeschlossener Medien	Federthermometer
	Ohmscher Widerstand	Temperaturabhängig- keit des Widerstands	Widerstands- thermometer
	elektrische Spannung	Seebeck-Effekt	Thermoelement
elektrischer Strom	Kraft (Moment)	Kraftwirkung des elektrischen Stroms (elektro- dynamisches Kraftgesetz)	Elektromagnet, Tauchspule, Drähspule

2. Grundstrukturen

Die Überlegungen im vorangegangenen Abschnitt ergaben, daß eine Meßeinrichtung prinzipiell als ein Glied mit je einem Ein- und Ausgang darstellbar ist (Bild 2.1 a).

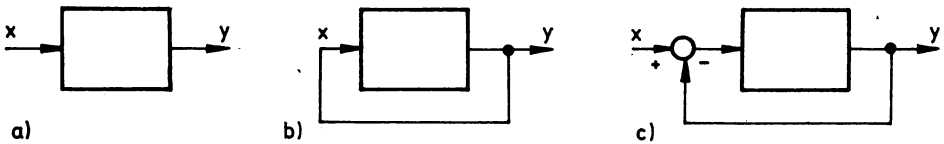


Bild 2.1: Kybernetische Systeme

- a) offenes System; b) geschlossenes System;
c) rückgekoppeltes (offenes) System

Treten Störgrößen hinzu, hat das Glied mehrere „Eingänge“. In der Darstellungsweise der Kybernetik heißen solche Systeme *einfach* (oder *mehrfach*) *gesteuerte offene Systeme*. Offen deshalb, weil keine Rückwirkung des Ausgangs auf den Eingang erfolgt. Wohl aber kann ein nachfolgendes System auf den Ausgang zurückwirken, ebenso wie das offene System auf seine Vorgänger einwirken kann (die Meßeinrichtung also auf den Prozeß), wie das später noch behandelt wird.

Geschlossene Systeme spielen in der Meßtechnik kaum eine Rolle. Bei ihnen ist Ein- und Ausgang nicht zu unterscheiden (Bild 2.1 b), und das Signal läßt sich entnehmen, ohne daß die Systemfunktion, z. B. eine Signalgenerierung, beeinflusst wird.

Meßtechnisch bedeutend ist dagegen eine dritte Systemgruppe, die *Systeme mit Rückführung* (Bild 2.1 c). Durch die Rückführung können die Eigenschaften des Systems entscheidend verändert werden.

Aus Bild 1.1 ergab sich für das Beispiel, daß die Meßeinrichtung eine *Kettenschaltung* von Meßfühler und nachgeschalteten Wandlungsgliedern ist. Prinzipiell ist das richtig, auch dann, wenn ein Block (ein Wandlungsglied) intern eine andere Struktur enthält.

Beispiel:

Elektronische Verstärker in integrierter Technik (sog. Operationsverstärker, siehe [3]) werden in ihrem Übertragungsverhalten wesentlich durch das Rückkopplungsnetzwerk bestimmt. Als Bauglied innerhalb einer Meßeinrichtung betrachtet, interessiert nur Eingang und Ausgang, Übertragungsfaktor und Grenzfrequenz, während für die Auslegung detailliertere Kenntnisse erforderlich sind, die darauf fußen, daß dieses Bauglied intern eine Rückkopplung enthält.

Die Kettenschaltung ist aber auch für die Meßeinrichtung nicht zwingend die allein mögliche Struktur. Es ist im Gegenteil möglich, durch Wahl der Struktur die Einwirkung von Störungen (etwa solche im Bild 1.1 b) teilweise oder ganz zu eliminieren. Man darf aber nicht erwarten, eine universelle Vorschrift nutzen zu können; Nutz- und Störsignal müssen sich in irgend einer Form signifikant voneinander unterscheiden, so z. B. durch den Amplituden- oder Frequenzbereich, in denen beide auftreten, das Vorzeichen ihrer Einwirkung oder den Angriffsort im Meßsystem.

Wegen des Einführungscharakters dieses Lehrmaterialbausteins wird hier eine phänomenologische Erläuterung gegeben und die mathematisch hochinteressante Analyse fortgelassen; auch muß für

Anwendungsfälle auf nachfolgende Lehrmaterialbausteine verwiesen werden. Grundaussagen sind aber möglich und auch ohne vertiefende Theorie verständlich.

2.1. Reihenstruktur

Diese Struktur wurde oben bereits als typisch für Meßeinrichtungen genannt. Bild 2.2 zeigt sie in einer etwas abgewandelten Darstellung: die Störgröße z überlagert sich additiv der Meßgröße x . Beide sind nur trennbar, wenn sie sich im Frequenzbereich unterscheiden.

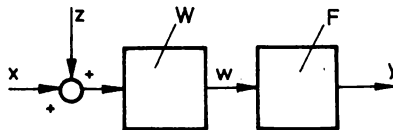


Bild 2 2: Reihenstruktur
W Wandler, F Filter

Hat z. B. die Meßgröße eine nur kleine Änderungsgeschwindigkeit (und damit eine niedrige Grenzfrequenz), so kann ein dem Wandler W nachgeschaltetes Filter F (als Zusatzglied) eine dem Nutzsignal überlagerte Störspannung unterdrücken, da diese meistens höherfrequent sind (Typischer Fall: 50-Hz-Brummspannung wird durch Netzfilter unterdrückt).

2.2. Kreisstruktur

Andere Störgrößen als Störspannungen können ebenso häufig im gleichen Frequenzbereich wie die Meßgröße liegen, also ebenso niederfrequent sein wie diese. Hier kann die Nutzung aus der Regelungstechnik bekannter Zusammenhänge Abhilfe schaffen: der Regelkreis hat unter bestimmten Voraussetzungen störungsunterdrückende Eigenschaften, und zwar dann, wenn die Störungen zwar vor dem Wandler angreifen (wie im Bild 2.2), aber das Meßsignal vorher noch genügend verstärkt werden kann, wie das im Bild 2.3 durch den Verstärker V symbolisiert wird.

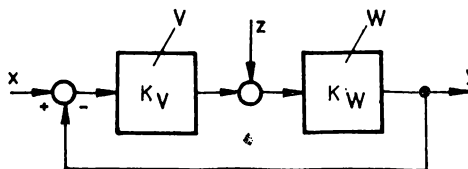


Bild 2.3: Kreisstruktur
V Verstärker, W Wandler

Für die Ausgangsgröße y gilt (hier ohne Herleitung aus den Frequenzganggleichungen und ohne Stabilitätsbetrachtungen)

$$y = \frac{K_W z + K_V K_W x}{1 + K_V K_W} \quad (2.1)$$

Es ist ersichtlich, daß ein großer Übertragungsfaktor des Verstärkers K_V (gegenüber K_W) zu einer relativen Absenkung der Störungswirkung z führt, eine Eigenschaft, die sich die Kompensationsmethode bewußt zunutze macht. Viele Meßumformer in der Prozeßmeßtechnik sind deshalb Kompensations-Meßumformer (siehe [6]).

2.3. Parallelstruktur

Eine Parallelstruktur besteht aus zwei prinzipiell gleichen Wandlungsgliedern, auf die eine Meßgrößenänderung gegensinnig, die Störgröße jedoch gleichsinnig wirkt (Bild 2.4).

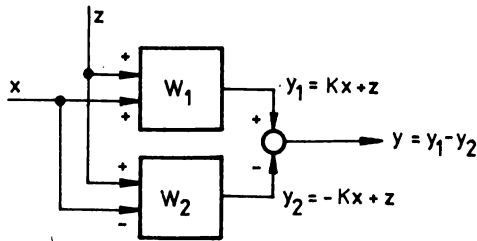


Bild 2.4: Parallelstruktur

Durch nachfolgende Differenzbildung entfällt die Störgröße z im Ergebnis y :

$$\begin{aligned} y_1 &= K x + z \\ y_2 &= -K x + z \\ y &= y_1 - y_2 = K x + z - (-K x + z) \\ y &= 2 K x \end{aligned} \quad (2.2)$$

Die Parallelstruktur ist in der Meßtechnik weit verbreitet; neben der Störungseliminierung ergibt sich eine Verdopplung des Übertragungsfaktors und eine, in der obigen einfachen Darstellung nicht zum Ausdruck kommende Linearisierung der Kennlinie in einem größeren Bereich. Speziell dafür ausgelegte Wandlungsglieder sind als „Differentialgeber“ bekannt (nicht zu verwechseln mit der Differenzmethode, siehe [1], Abschnitt 4.2.).

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die bekannte Brückenschaltung ebenfalls eine Parallelstruktur ist; in ihr wird gleichzeitig die Differenzbildung realisiert (ein Differentialgeber bildet jeweils zwei der insgesamt vier Brückenzweige).

Aus der Parallelstruktur nach Bild 2.4 ist als eine Variante auch die Störkompensation ableitbar; sie ist dann zweckmäßig, wenn für die Meßgröße kein Differentialwandler anwendbar ist, die Störung aber mit einem zweiten Meßfühler erfaßt werden kann (Bild 2.5).

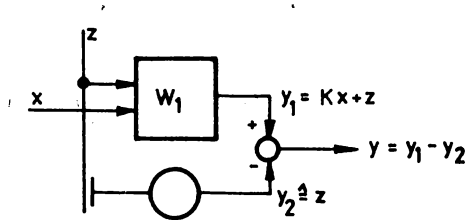


Bild 2.5: Störgrößen-Kompensation

In der Regelungstechnik ist dieses Prinzip als Störgrößenaufschaltung bekannt.

Komplexere Meßsysteme sind immer Kombinationen der hier vorgestellten Grundstrukturen. Als ein Beispiel ist im Bild 2.6 die Struktur einer Meßeinrichtung dargestellt, die eine Meßgröße über größere Entfernung übertragen soll und zu diesem Zwecke eine Funkstrecke benutzt. Hieran kann anschaulich demonstriert werden, welche Hilfseinrichtungen (Energie, Hilfssignal in Form einer Trägerschwingung) für derartige Aufgaben erforderlich sind. Eine Detailanalyse würde auf eine große Zahl der inzwischen bekannten Strukturen führen.

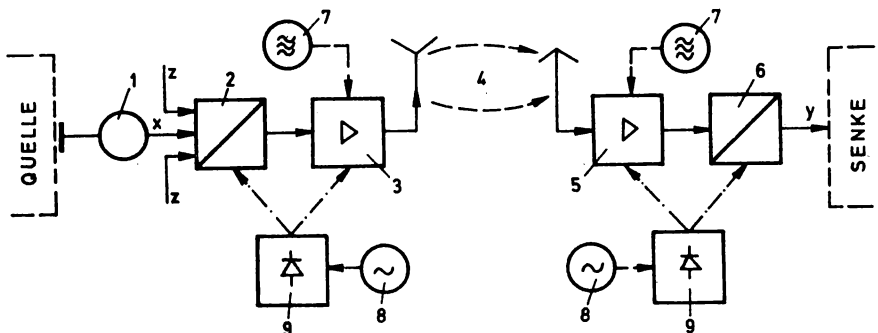


Bild 2.6: Komplexbeispiel

1 Meßfühler zur Informationsgewinnung, 2 Wandler in Einheitssignal, 3 Sender (Verstärker, Modulator), 4 Übertragungskanal, 5 Empfänger (Demodulator, Verstärker), 6 Wandler in verarbeitbares Signal, 7 Bereitstellung von Hilfssignalen (Trägerfrequenz), 8 Energiequelle (Netz), 9 Energieaufbereitung (Umspannung, Gleichrichtung)

- A 2.1. Welche Vor- und Nachteile hat die Kreisstruktur gegenüber der Kettenstruktur?
A 2.2. Nennen Sie Eigenschaften der Parallelstruktur!

3. Einheitssysteme

In [1], Abschnitt 3.2., wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Vielfalt der Meßgrößen, der möglichen Abbildungssignale und der Wertebereiche zu einer Vereinheitlichung bestimmter Parameter zwingt. Dieser Zwang zu Systemlösungen ist objektiver Natur; er ist im letzten Jahrzehnt in vielen technischen Bereichen anzutreffen und wird sich weiter verstärken. Gründe dafür sind die schon genannte wachsende Vielfalt der Aufgaben und Varianten, rationelle Fertigung bei weniger Typen, die Aufwendungen für Lagerhaltung, Wartung u. v. a.

Zu einheitlichen Systemlösungen gelangt man durch Zerlegung der verschiedenen Meßaufgaben in *Grundfunktionen* und deren gerätetechnische Realisierung in einer *reduzierten Anzahl* von Varianten. Ein solches Vorgehen muß das Zusammenwirken der Funktionseinheiten an bestimmten, definierten Schnittstellen berücksichtigen. Einheitssysteme sind also weitgehend gekennzeichnet durch

- Festlegung von *Schnittstellen* zwischen Systembestandteilen unterschiedlicher Funktion,
- Festlegung der *Anschlußparameter*, ihrer Wertebereiche und Toleranzen,
- Festlegung der *Hilfsfunktionen* (Energieversorgung, Gefäßsystem, Prüfung, Lagerung, Transport ...).

Für Meßeinrichtungen, wie sie in ihrer Grundstruktur bereits erläutert wurden, sind drei Schnittstellen typisch und vereinbart (Bild 3.1):

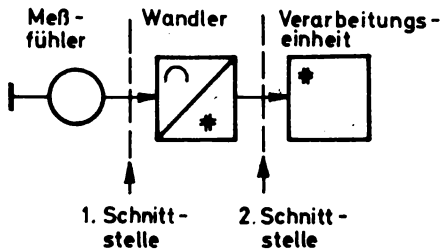


Bild 3.1: Schnittstellen zwischen Funktionseinheiten

- die Schnittstelle zwischen *Meßfühler* und *Wandler*. Das führt auf vereinbarte Zwischenabbildungssignale (Weg, Kraft, Moment, Widerstand, elektrische Spannung), die an den Anschlußklemmen allerdings nicht in Erscheinung treten. Sie sind für den Hersteller jedoch sehr vorteilhaft und daher meistens nur für eine bestimmte Erzeugnisgruppe vereinheitlicht;
- die Schnittstelle zwischen *Geräten eines Einheitssystems*. Hier gelten die Festlegungen über Einheitssignale, wie sie in [1], Abschnitt 3.2., schon vorgestellt wurden. Sie sind weitgehend international vereinheitlicht;
- die Schnittstelle zwischen *Geräten und universell nutzbaren Einheiten zur Informationsverarbeitung* (Prozeßrechner, Mikrorechner, Mikroprozessoren, Meßwerterfassungsanlagen, digitale Meßsysteme). Die Anschlußbedingungen und -bilder werden als *Standard-Interface* bezeichnet und umfassen genormte Bedingungen für die Anschließbarkeit über ein *Bus-System* (Bus: Leitungsbündel mit 10 ... 100 Leitungen).

Über die beiden ersten Schnittstellen wurden oben schon Einzelheiten mitgeteilt. Hier sollen die Grundzüge einer Busstruktur dargestellt werden. Dazu wird von der Verbindung von drei Funktionseinheiten (Bild 3.2) ausgegangen.

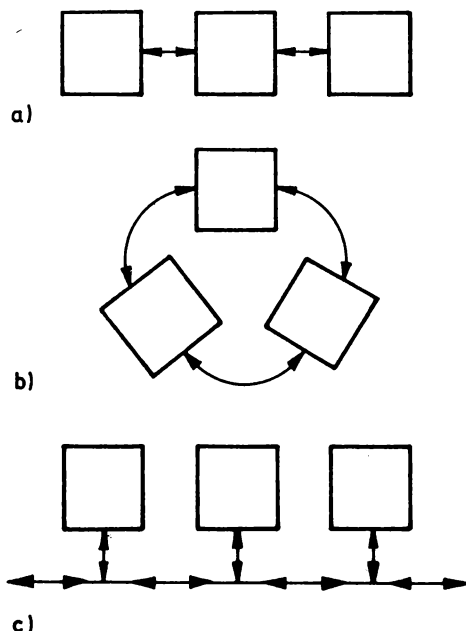


Bild 3.2: Verbindungen zwischen Funktionseinheiten

a) Kettenstruktur; b) Netzstruktur; c) Busstruktur

Es sind dafür drei Datenwege denkbar: in *Kettenstruktur* (Bild 3.2 a), *Ringstruktur* (oder *Netzstruktur*, Bild 3.2 b) oder über einen gemeinsamen Sammelweg (*Busstruktur*, Bild 3.2 c). Die beiden ersten Möglichkeiten führen schnell zu einem enormen Ansteigen der nötigen Verbindungen und gegenseitiger Blockierung, wenn „jeder mit jedem“ verkehren kann oder muß.

Die meisten Bussysteme arbeiten mit einer zentralen Bussteuerung, die für die zentrale Steuerung und Überwachung des Bussystems sorgt. Dabei werden im Bus bestimmte Leitungen für bestimmte Funktionen reserviert, so z. B. für

Daten	8 ... 24 Leitungen
Adressen	4 ... 8 Leitungen
Funktionen	5 Leitungen
Zeitsteuerung	3 ... 8 Leitungen

Letztere sind nötig, um den zeitlichen Ablauf einer Übertragung zu steuern. An den Bus lassen sich nun beliebige Funktionseinheiten anschließen (Bild 3.3); ihr Zusammenwirken wird durch die gemeinsame Bussteuerung gewährleistet.

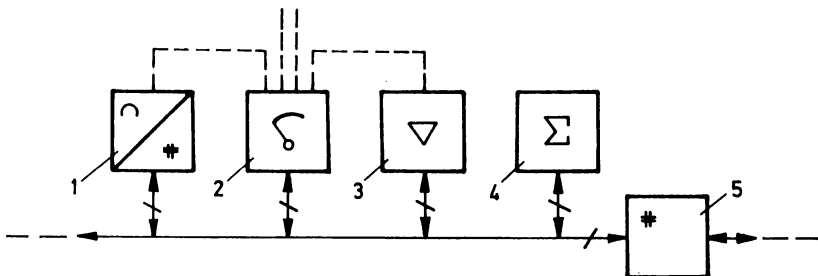


Bild 3.3: Busstruktur einer Meßwertverarbeitungsanlage

- 1 Analog-Digital-Umsetzer, 2 Meßstellenumschalter, 3 Verstärker, 4 Recheneinheit (Mikrorechner),
5 Bussteuerung

Über ihre spezielle Adresse nicht aufgerufene Einheiten nehmen auch nicht am Datenverkehr teil. Auf diese Weise sind komplexere Meßsysteme überhaupt erst möglich (z. B. Meßwerterfassungs- und Auswerteanlagen in der Kerntechnik, der Forschung, der Informationstechnik, aber auch der Längen-, Analysen- und Prozeßmeßtechnik).

Der Datenaustausch über den Bus erfolgt nur mit diskreten Signalen; eventueller Austausch von Analogsignalen erfolgt über separate, nicht zum Bus gehörige Leitungen. Ein solches Konzept sichert die gegenseitige Entkopplung und zugleich Universalität der Systeme. Konstruktiv wird das so gelöst, daß die Funktionseinheiten als Einschübe in Rahmen gesteckt werden. An den rückseitigen Steckerleisten ist die Busverdrahtung einheitlich fest ausgeführt; analoge Verbindungen erfolgen über Koaxial-Steckverbindungen an der Frontseite (im Bild 3.3 gestrichelt gezeichnet). Da der Steckrahmen fest verdrahtet ist, kann ein Einschub an beliebiger Stelle eingesteckt werden, das System ist damit sehr einfach erweiter- oder abrüstbar.

Einige heute gebräuchliche Einheitssysteme, die auch für die Meßtechnik von Interesse sind, heißen:

ursamat	einheitliches System der Automatisierungstechnik der DDR (nationale Variante im URS des RGW)
ESEG	einheitliches Gefäßsystem
ESDM	einheitliches System der digitalen Meßtechnik (VEB Kombinat Mikroelektronik Erfurt)
ESER	einheitliches System der Rechentechnik im RGW
ESEN	einheitliches System der Nachrichtentechnik im RGW
SI 1.2, SI 2.2	Standard-Interfaces der DDR
CAMAC	Instrumentierungssystem mit Busstruktur (Kernforschung u. a.)
IEC 66.22	Einheits-Bussystem der Internationalen Elektrotechnischen Kommission.

A 3.1. Wodurch zeichnen sich Einheitssysteme aus?

A 3.2. Was ist ein Bus?

Zusammenfassung zu den Abschnitten 1. bis 3.

Bauglieder in Meßeinrichtungen sind die elementaren Funktionseinheiten zur Wandlung einer physikalischen Größe in eine andere. Die Zahl dieser Umwandlungen ist bereits in einfachen Meßeinrichtungen beträchtlich, was in den üblichen Strukturdarstellungen selten zum Ausdruck kommt. Eine erste Analyse zeigt, daß mechanische Größen (Weg, Kraft, Winkel) häufig Träger von Abbildungssignalen sind, ebenso die elektrische Spannung.

Die kybernetischen Grundstrukturen des offenen und des rückgekoppelten Systems finden sich auch in Meßeinrichtungen. Durch Strukturwahl ist es möglich, Störeinflüsse unter bestimmten Bedingungen zu beherrschen.

Wegen der gesetzmäßig wachsenden Vielfalt an Meßaufgaben, Einsatz- und Wertebereichen ist der Übergang zu Systemlösungen mit vereinheitlichten Funktionseinheiten und Anschlußbedingungen die logische Folge. Neben die schon bekannten Einheitssignale in Automatisierungsanlagen treten für den Übergang zu Verarbeitungseinheiten sogenannte Bus-Strukturen, die den universellen Geräteanschluß und -betrieb über eine Sammelleitung sicherstellen. Busstrukturen sind charakteristisch für die Nutzung der Fortschritte auf dem Gebiet der Mikroelektronik in der Meß- und Prüftechnik.

Übung zu Abschn. 3.

Ü 3.1. Eine Meßeinrichtung ähnlich der in Bild 1.2 und Bild 1.3 soll in ein Einheitssystem einbezogen werden. Zur Anpassung an verschiedene Druckmeßbereiche wird als erste Schnittstelle die Abbildungsgröße Weg mit $\hat{s} - s_0 = 0,1 \text{ mm}$ festgelegt. Die Spannung U_1 soll den Einheitssignalbereich $0 \dots 10 \text{ V}$ einhalten. Wie groß muß – bei vorausgesetzter Linearität – der Übertragungsfaktor der Glieder 2 bis 4 sein?

Lösungen der Aufgaben und Übungen

- A 1.1. Signalfußbilder abstrahieren von der physikalisch-technischen Wirkungsweise, heben die funktionellen Zusammenhänge hervor und gestatten so allgemeingültige Aussagen.
- A 1.2. Die Anordnung in Tafel 1.2 verknüpft Eingang und Ausgang und entspricht damit der Signalfußdarstellung.
- A 1.3. mechanisch: Weg,
elektrisch: Spannung .
- A 2.1. Vorteile:
Unterdrückung von Störungen, Beeinflussung des Übertragungsfaktors durch Auslegung des Rückführzweiges,
Nachteile: höherer Aufwand, niedrigere Grenzfrequenz .
- A 2.2. Linearisierung möglich, mehrere Eingangsgrößen und deren rechnerische Verknüpfung möglich .
- A 3.1. Zerlegung in Grundfunktionen führt zu reduzierter Zahl von Varianten; vereinheitlichte Schnittstellen für Zwischen- und Ausgangssignale; Unifizierung bei möglicher universeller Anwendung .
- A 3.2. Leitungsbündel für Daten, Adressen, Befehle und Meldungen; beliebig viele Funktionseinheiten anschließbar .
- Ü 3.1. Die Umwandlung des Wegsignals $(0 \dots 0,1) \text{ mm}$ in eine Spannung $U_1 = (0 \dots 10) \text{ V}$ erfordert einen Übertragungsfaktor

$$K_2 K_3 K_4 = \frac{10 \text{ V}}{0,1 \text{ mm}} = 0,1 \text{ V}/\mu\text{m}.$$

Literaturverzeichnis

- [1] *Richter, W.*: Einführung in die Meß- und Prüftechnik. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1006 01 1. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1978.
- [2] Autorenkollektiv: Lehrbuch der Automatisierungstechnik. 11. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1978.
- [3] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.11 – Geräte und Einrichtungen zur Messung elektrischer Größen. Messung elektrischer Grundgrößen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 21 1. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1978.
- [4] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.13 – Messungen in elektrischen Energienetzen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 21 3. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1979.
- [5] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.14 – Messung elektrischer Größen im Niederfrequenzbereich. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 21 4. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1979.
- [6] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.21 – Geräte und Einrichtungen zur Messung nichtelektrischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 22 1. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1979.
- [7] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.22 und 2.23 – Messung mechanischer Größen. Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 22 2 und 03 1677 22 3. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1979.
- [8] *Richter, W.*: Meßsysteme 2.41 – Messung von Stoffeigenschaften. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 24 1. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1979.
- [9] *Hoschke, G.*: Meßsysteme 0.10 – Systeme zur Messung elektrischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 01 0. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1978.
- [10] *Hofmann, W.*: Meßsysteme 0.20 – Systeme zur Messung mechanischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 03 1677 02 0. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1978.

Dipl.-Ing.-Ök. Gerd Stalloch

M E S S – S Y S T E M E

3

Systeme zur Temperaturmessung

Herausgeber:

Ingenieurschule
für Bergbau und Energetik
„Ernst Thälmann“
Senftenberg

03 1677 03 0

Dieser Lehrbrief wurde
verfaßt von:

Dipl.-Ing.-Ök. Gerd S t a l l o c h
Mitarbeiter des VEB Synthesewerk Schwarzheide

lektoriert von:

Dipl.-Phys. Martin S c h r o e d t e r
Fachschullehrer an der Ingenieurschule für
Bergbau und Energetik "Ernst Thälmann"
Senftenberg

bearbeitet von:

FSD Dipl.-Ing. Annemarie H e r t w i g
Beauftragte für die Entwicklung von Lehrbriefen
an der Ingenieurschule für Bergbau und Energetik
"Ernst Thälmann" Senftenberg

Redaktionsschluß: 10. 10. 1984

Als Manuskript gedruckt - Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlicht:

INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
Karl-Marx-Stadt

Druck und buchbinderische Verarbeitung:

ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU
Ag 613/286/86/900 3. Ausgabe 2. Auflage

Vorzugsschutzgebühr: 2,00 M

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Allgemeine Grundlagen der Temperaturmessung	5
2. Berührungsthermometer	19
2.1. . Mechanische Berührungsthermometer	19
2.1.1. Flüssigkeitsausdehnungsthermometer	19
2.1.2. Federthermometer	25
2.1.3. Metallausdehnungsthermometer	27
2.2. Elektrische Berührungsthermometer	28
2.2.1. Widerstandsthermometer	28
2.2.2. Thermoelemente	33
2.2.3. Halbleitermeßwiderstände	39
3. Temperaturmessung auf der Basis der Wärmestrahlung	41
3.1. Physikalische Grundlagen	41
3.2. Technische Pyrometer	43
3.2.1. Gesamtstrahlungs-pyrometer	43
3.2.2. Teilstrahlungs-pyrometer	45
4. Digitale Temperaturmeßeinrichtungen	46
Lösungen der Aufgaben	47
Literaturverzeichnis	48
Beilage (Bild 9, 10, 13, 14)	

Vorwort

Der vorliegende Lehrbrief stellt eine Überarbeitung und Erweiterung des 1977 herausgegebenen Lehrbriefes dar. Im wesentlichen blieb die von Herrn FSD Dipl.-Ing. Heinz Höhna verfaßte Ausgabe erhalten, wurde aber durch die Grundwerte nach TGL 39438 und 39440 sowie durch Tafeln für allgemeine Grundlagen und Bilder zur technischen Ausführung /1/ ergänzt.

Gerd Stalloch

Verzeichnis der Kurzzeichen

A Fläche	T Temperatur, absolute
a Mengenkonzstante	t Zeit, Temperaturdifferenz
b Energiekonstante	V Volumen
C Konstante, Celsius	W Wärmemenge
c spezifische Wärme	α linearer Ausdehnungskoeffizient bzw. Wärmeübergangszahl bzw. Temperaturkoeffizient
E, e Urspannung, Thermospannung	β Temperaturkoeffizient
f Funktion von ...	γ kubischer Ausdehnungskoeffizient bzw. Temperaturkoeffizient
K Konstante, Kelvin	ϑ Temperatur, Celsiusskala
L Strahldichte	ε Emissionsgrad
l Länge	λ Wärmeleitzahl bzw. Wellenlänge
m Masse	Φ Strahlungsfluß
p Druck	σ Strahlungskonstante
R Widerstand	τ Zeitkonstante
Q Wärmemenge	
S Entropie	
s Sekunde	

Umrechnungsbeziehung von Temperatureinheiten

gesucht gegeben	$^{\circ}\text{C}$	K	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{R}$
n $^{\circ}\text{C}$	n	$n - 273,15$	$32 + \frac{9}{5} n$	$\frac{4}{5} n$
n K	$n + 273,15$	n	-	-
n $^{\circ}\text{F}$	$\frac{5}{9} (n - 32)$	-	n	$\frac{4}{9} (n - 32)$
n $^{\circ}\text{R}$	$\frac{5}{4} n$	-	$32 + \frac{9}{4} n$	n

1. Allgemeine Grundlagen der Temperaturmessung

Technische, physikalische, chemische und physiologische Prozesse sind häufig mit thermischen Wirkungen eng gekoppelt. Temperaturmessungen liefern deshalb direkt oder indirekt wichtige Informationen über den Verlauf der Prozesse. Die Temperatur eines Meßobjektes ist eine Zustandsgröße, die seinen Wärme(energie)zustand beschreibt.

Temperaturmessungen sind in Forschung, Entwicklung und Produktion aller Industriezweige anzutreffen. In Stückgutprozessen dienen etwa 10 %, in Fließprozessen etwa 50 % aller Messungen der Ermittlung thermischer Größen.

Insbesondere der Verlauf, die Wirtschaftlichkeit von technologischen Prozessen und die Qualität der Produkte sind in starkem Maße von der Temperatur abhängig. Somit besteht ein enger Zusammenhang zwischen Technologie und Temperaturmessung.

Gleichfalls ist zu beachten, daß Energie teuer ist und nur begrenzt zur Verfügung steht. Um Wärmeenergie mit einem hohen Wirkungsgrad auszunutzen, bedarf es einer genauen wärmetechnischen Kontrolle, zu der die Temperaturmessung gehört. Es besteht ein volkswirtschaftlich wichtiger Zusammenhang zwischen Temperaturmessung und Energiebedarf. Temperaturmessung dient somit zur

- Sicherung des Prozeßverlaufs und zur Gewährleistung der Betriebssicherheit,
- rationellen Energieanwendung bei optimaler wärmewirtschaftlicher Prozeßführung,
- Verbesserung der Wirkungsgrade von Aggregaten und Anlagen bei genauer Ermittlung technisch-ökonomischer Parameter.

Die (thermodynamische) Temperatur ist die Basisgröße aller thermischen Größen im Internationalen Einheitensystem und gibt den Energiezustand eines Körpers an.

Die SI-Einheit der Temperatur ist das Kelvin (K). Gleichberechtigt wird neben der SI-Einheit auch Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) verwendet (Anmerkungen: nicht $^{\circ}\text{K}$; Vorsätze nur für K, nicht für $^{\circ}\text{C}$; Temperaturdifferenzen und zulässige Abweichungen grund-

sätzlich in K, z. B. $20^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$).

Das Kelvin ist der 273,15te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunktes von reinem Wasser.

Der Tripelpunkt ist ein durch eine bestimmte Temperatur und einen bestimmten Druck gekennzeichneten Zustand, in dem sich die feste, flüssige und gasförmige Phase eines Stoffes im Gleichgewicht befindet. Bei Wasser liegt dieser Punkt bei 273,15 K und etwa 1013 mbar. Die Temperaturdifferenz $\Delta t = T - T_0$ mit $T_0 = 273,15\text{ K}$ wird als Celsius Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) bezeichnet. Sie wird weiterhin angewendet (jedoch unter Beachtung der obigen Anmerkungen).

Mit der (thermodynamischen) Temperatur stehen weitere thermische Größen in Verbindung.

Die Wärmemenge ist eine Form der Energie. Sie entspricht der einem Körper in Form von Wärme zugeführten oder entzogenen Energie, die die mittlere kinetische Energie seiner Moleküle ändert.

Die SI-Einheit der Wärmemenge ist das Joule (J). Ein Joule ist die Wärmemenge, die der mechanischen Arbeit (Energie) von 1 N · m gleich ist. Andere Bezeichnungen für die Wärmemenge sind auch Enthalpie, innere Energie, Phasenumwandlungs- oder chemische Reaktionswärme.

Die Grundgleichung der Wärmelehre lautet:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad (1)$$

Die SI-Einheiten sind:

$$\begin{array}{ll} [Q] = \text{J} & [m] = \text{kg} \\ [c] = \text{vgl. Gl. 2} & [\Delta t] = \text{K} \end{array}$$

Die von einem Körper aufgenommene Wärmemenge ist somit der Masse des Körpers und der Temperaturdifferenz proportional. Der Proportionalitätsfaktor - genannt die spezifische Wärmekapazität - wird experimentell nach Gleichung

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad (2)$$

bestimmt und erhält die abgeleitete Einheit

$$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}.$$

Die spezifische Wärme ist für ausgewählte Stoffe entsprechenden Arbeitstafeln zu entnehmen.

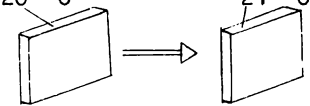
Weitere thermische Größen sind die Wärmekapazität, die Entropie, der Wärmestrom und die Wärmeleitfähigkeit. Kenngrößen sind für thermische Vorgänge in bestimmten Stoffen der Wärmeübergangskoeffizient, der Wärmedurchgangskoeffizient sowie der thermische Längen- und Volumenausdehnungskoeffizient.

Symbole, Einheiten, Kurzzeichen, Definitionen, Beziehungen zu anderen Größen und die Erläuterung aller thermischen Größen sind der Tafel 1 zu entnehmen.

Zur Darstellung von Temperaturwerten für Vergleichszwecke wird die sogenannte Internationale Praktische Temperaturskala (IPTS) in der Fassung von 1968 (IPTS-68) verwendet, wie sie im Bild 1 dargestellt ist. Die Festpunkte (auch Fixpunkte) sind hierin unterstrichen.

Tafel 1: Thermische Größenarten und Einheiten

Größenart Symbol Einheit Einheiten- zeichen	Temperatur T Kelvin K	Wärmemenge Q Joule J
Definition	Das Kelvin ist der 273,16te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunkts von Wasser	Ein Joule ist die Wärmemenge, die der mechanischen Arbeit (Energie) von 1 J gleich ist
Beziehung Erläuterung	Basisgröße Die Temperaturdifferenz $\Delta t = T - T_0$ mit $T_0 = 273,15 \text{ K}$ wird als Celsius-Temperatur bezeichnet und erhält das Einheitenzeichen $^{\circ}\text{C}$	$Q = W$ $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ $= 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ weitere Benennungen: - Enthalpie - freie Energie - innere Energie - Phasenumwandlungswärme - chemische Reaktionswärme

Größenart Symbol Einheit Einheitszeichen	Wärmekapazität C Joule je Kelvin J · K ⁻¹	Entropie S Joule je Kelvin J · K ⁻¹
Definition	Ein Joule je Kelvin ist die Wärmekapazität eines Körpers, dessen Temperatur bei Zuführung der Wärmemenge 1 J um 1 K erhöht wird.	Ein Joule je Kelvin ist die Entropieänderung eines Systems, dem bei der Temperaturänderung um 1 K die Wärmemenge 1 J reversibel zugeführt wird.
Beziehung Erläuterung	$C = \frac{Q}{\Delta T}$  vor und nach der Zuführung der Wärmemenge 1 Joule	$S = \frac{Q}{T}$ Siehe Erläuterung zu Wärmekapazität. Die spezifische Entropie ist die auf die Masse bezogene Entropie. $s = \frac{S}{m} \text{ mit der Einheit } J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}.$
Größenart Symbol Einheit Einheitszeichen	Wärmestrom $\dot{Q}$ Watt W	
Definition	Ein Watt ist der Wärmestrom, der der mechanischen Leistung von 1 W gleich ist.	
Beziehung Erläuterung	$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ $= 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ $= 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ t Zeit s	

Für die Temperaturmeßtechnik werden physikalische Grundgesetze der

- thermischen Ausdehnung für mechanische Berührungsthermometer,
- Thermoelektronik für elektrische Berührungsthermometer,
- Wärmestrahlung für Strahlungsthermometer (Pyrometer)

angewendet.

Die wichtigsten Grundgesetze der thermischen Ausdehnung von festen und flüssigen Körpern sind in Tafel 2 dargestellt.

Für die kubische Ausdehnung gasförmiger Körper gelten für spezielle Fälle der Zustandsformen - abgeleitet aus der Zu-

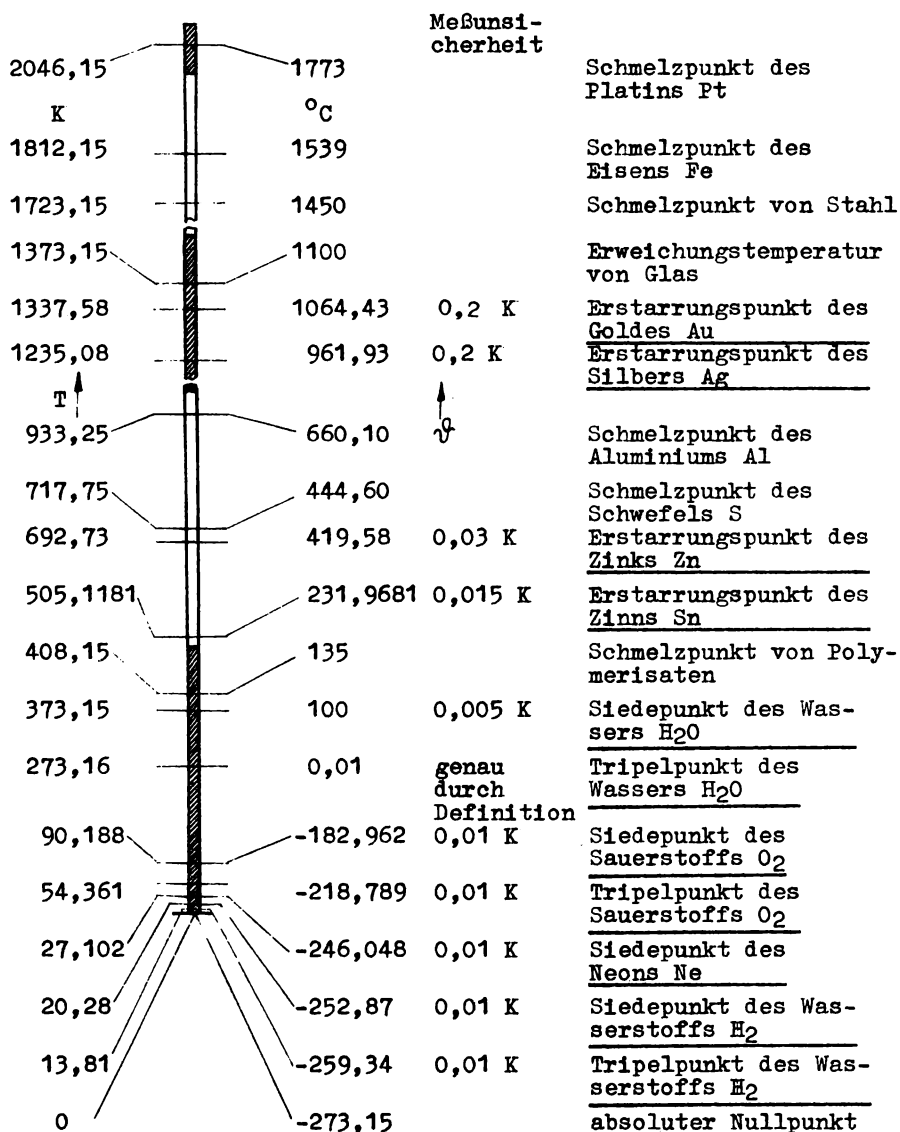


Bild 1: Internationale Praktische Temperaturskala (IPTS-68)

standsgleichung für ideale Gase - die Gesetze von GAY-LUSSAC und BOYLE-MARIOTTE, welche in Tafel 3 zusammengefaßt sind. Der Wärmetransport kann durch

- Wärmeströmung (auch Wärmekonvektion genannt),
- Wärmeleitung,
- Wärmestrahlung

erfolgen.

Unter Wärmeströmung ist die Mitführung von Wärme durch sich bewegende Flüssigkeiten oder Gase zu verstehen.

Die Wärmeleitung ist die Ausbreitung von Wärmeenergie innerhalb von Körpern. Bei der Wärmestrahlung ist zwischen Wärmequelle und Wärmeempfänger kein übertragender Stoff erforderlich. Die Übertragung erfolgt durch elektromagnetische Wellen, welche sich hinsichtlich der Ausbreitung, der Reflexion und der Brechung wie das Licht verhalten. Für die Wärmeleitung, den Wärmeübergang und den Wärmedurchgang gelten die Beziehungen entsprechend Tafel 4.

Tafel 2: Grundgesetze der thermischen Ausdehnung von festen und flüssigen Körpern

Art der Ausdehnung	linear	kubisch
Länge bzw. Volumen bei ϑ_1	$l_1 = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$	$V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta \vartheta)$
Ausdehnungskoeffizienten	$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta \vartheta}$	$\gamma = 3 \cdot \alpha$

Der Wärmeübergang ist der Transport von Wärmeenergie zwischen verschiedenen Stoffen (z. B. einem Gas oder einer Flüssigkeit und einem festen Körper) mit unterschiedlicher Temperatur, wobei die Übertragung in der Berührungszone stattfindet.

Der Wärmedurchgang ist der Übergang von Wärme zwischen zwei Medien durch eine trennende Wand. Der Wärmedurchgang voll-

Tafel 3: Übersicht zu den Gasgesetzen
(γ Temperatur $^{\circ}\text{C}$, T Temperatur K)

Benennung	1. Gesetz von GAY-LUSSAC	2. Gesetz von GAY-LUSSAC	Gesetz von BOYLE-MARIOTTE
Zustands- änderung	isobar	isochor	isotherm
Bedingung	$p = \text{konst.}$	$V = \text{konst.}$	$p \cdot V = \text{konst.}$
Mathematische Formulierung für einen Zustand	$V_1 = V_0 \left(1 + \gamma \cdot \Delta\gamma\right)$	$p_1 = p_0 \left(1 + \gamma \cdot \Delta\gamma\right)$	$p \cdot V = \text{konst.}$
Koeffizienten	Ausdehnungs- koeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$	Spannungs- koeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$	
Mathematische Formulierung für zwei Zustände	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$

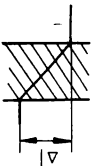
zieht sich somit in drei Schritten, nämlich dem Wärmeübergang vom ersten Stoff an die Oberfläche der Trennwand, Wärmeleitung durch die Wand und Wärmeübergang von der Oberfläche der Wand an den zweiten Stoff.

Wärmeleitfähigkeit, Wärmeübergang und Wärmedurchgang werden für die verschiedenen Stoffe durch Koeffizienten gekennzeichnet (vgl. Tafel 4).

Bei der Temperaturmessung erfolgt ein Wärmeaustausch zwischen Medium, Meßfühler und Umgebung. Dieser Vorgang ist erst abgeschlossen, wenn sich zwischen dem Meßfühler und der Umgebung ein thermischer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Eine optimale Temperaturerfassung ist nur möglich bei einem günstigen Wärmeübergang zwischen dem Medium und dem Meßfühler. Das wird erreicht durch

- eine große wärmeübertragende Meßfühlerfläche,
- einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten,
- die Temperaturdifferenz zwischen dem umgebenden Stoff und dem Meßfühler (vgl. auch Tafel 1 und 4).

Tafel 4: Wärmeleitung, Wärmeübergang und Wärmedurchgang

phys. Vorgang Größe Symbol	Wärmeleitung Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmeübergang Wärmeübergangskoeffizient α	Wärmedurchgang Wärmedurchgangskoeffizient k
Einheit	Watt je Meter und Kelvin $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Watt je Quadratmeter und Kelvin $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Watt je Quadratmeter und Kelvin $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Definition	Ein homogener Stoff hat die Wärmeleitfähigkeit $1 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, wenn eine Wärmestromdichte von $1 W \cdot m^{-2}$ auf der Länge m eine Temperaturänderung von $1 K$ hervorruft.	Ein Watt je Quadratmeter und Kelvin ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen zwei isothermen Flächen, zwischen denen beim Fließen einer Wärmestromdichte von $1 W \cdot m^{-2}$ die Temperaturdifferenz $1 K$ herrscht.	Ein Watt je Quadratmeter und Kelvin ist der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen zwei isothermen Flächen, zwischen denen beim Fließen einer Wärmestromdichte von $1 W \cdot m^{-2}$ die Temperaturdifferenz $1 K$ herrscht.
Beziehung	$\lambda = \frac{Q \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta T}$	$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T}$	$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$
Erläuterung	Flüssigkeit, Feststoff, Gas  Wärmestromdichte $\dot{Q}/A = 1 W \cdot m^{-2}$ $A = \text{Querschnittsfläche}$	Flüssigkeit, Feststoff, Gas  Grenzschicht	Feststoff  homogener Körper
Übertragene Wärmemenge	$Q = \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot t \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$	$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$	$Q = k \cdot A \cdot t \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$

- A Durchgangsfläche, Berührungsfläche $[A] = m^2$
- α Wärmeübergangskoeffizient $[\alpha] = W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- Q Wärmemenge $[Q] = J$
- λ Wärmeübergangskoeffizient $[k] = W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- l Übergangsstrecke $[l] = m$
- λ Wärmeleitfähigkeit $[\lambda] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- t Zeit bzw. Übertragungszeit $[t] = s$
- $\vartheta_1 - \vartheta_2$ Temperaturdifferenz $[\vartheta_1 - \vartheta_2] = K$

Hiervon ist auch die Einstellzeit des Meßfühlers und des Meßgerätes abhängig. Für die richtige Temperaturmessung gelten die folgenden Regeln:

1. Zwischen Meßfühler und Meßobjekt ist eine gute Wärmeübertragung (Wärmetransport) anzustreben.
2. Die Wärmekapazität des Meßfühlers soll möglichst klein sein im Verhältnis zum Meßobjekt.
3. Meßfehler durch Wärmestrahlung, -leitung oder -konvektion sind zu vermeiden.

Die Grundgesetze der Thermoelektrik und der Wärmestrahlung werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Je nach der Art der Wärmeübertragung vom zu messenden Stoff auf den Meßfühler können grundsätzlich zwei Temperatur-Meßgerätegruppen unterschieden werden:

- Wärmeübertragung durch Berührung (Berührungsthermometer),
- Wärmeübertragung durch Strahlung (Strahlungspyrometer; vgl. Abschn. 3).

Bei den Berührungsthermometern wird weiterhin unterschieden nach

- Längen- und Volumenausdehnung von Stoffen (mechanische Berührungsthermometer),
- Änderung des elektrischen Widerstandes bestimmter Stoffe bei Temperaturänderung (Widerstandsthermometer),
- thermoelektrischem Effekt (Thermoelemente).

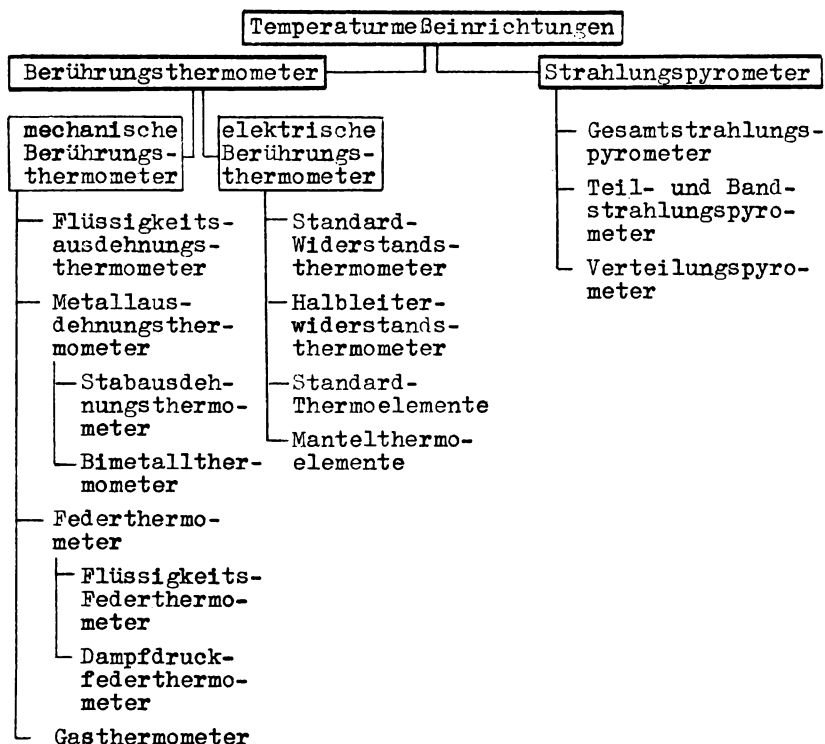
Eine Einteilung der Temperaturmeßeinrichtungen nach den Wirkprinzipien enthält Tafel 5.

Die Anwendungsbereiche der gebräuchlichsten Temperaturmeßeinrichtungen sind in Bild 2 dargestellt. Bei der Anwendung von Berührungsthermometern wird der Meßstelle Wärme entzogen.

Dieser Wärmeentzug ist unerheblich, wenn die Meßstelle eine genügend große Wärmekapazität besitzt.

Die entzogene Wärmemenge dQ in der Zeiteinheit dt durch Wärmeübergang ist proportional der Fühleroberfläche A , der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ und der Wärmeübergangszahl α :

Tafel 5: Einteilung der Temperaturmeßeinrichtungen nach den Wirkprinzipien



$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot A \cdot \Delta \vartheta. \quad (3)$$

Da das Gerät bzw. der Fühler nur die Wärme

$$Q_2 = m_2 \cdot c \cdot (T_1 - T_A) \quad m_2 \text{ Masse des Meßfühlers} \quad (4)$$

aufnehmen kann, wenn das Medium die Temperatur T_1 und der Fühler die Anfangstemperatur T_A besitzt, muß bei verlustlosem Wärmeübergang gelten

$$Q_2 = Q = \int \alpha \cdot A \cdot \Delta T \, dt$$

bzw.

$$m \cdot c \cdot (T_1 - T_A) = \alpha \cdot A \int \Delta T \, dt. \quad (5)$$

- Gesamtbereich der einzelnen Arten
 ——— Bereich einzelner Thermometer
 ---- praktisch kaum verwendeter Bereich

Temperatur

Festpunkte

Flüssigkeitsthermo-
meter allgemein

- mit Pentan
- mit Alkohol
- mit Toluol
- Hg und Normalglas 16^{III}
- Hg und Jenaer Glas 2954^{III}
- Hg und Supremax-Glas

Hg-Federthermometer

Dampfdruckthermometer

Stabausdehnungs-
thermometer

Bimetallthermometer

Widerstandsthermometer
allgemein

- mit Pt
- mit Ni
- mit Cu
- mit Halbleiter

Thermoelemente allgemein

- Cu-Konstantan
- NiCr-Konstantan
- Fe-Konstantan
- NiCr-Ni
- PtRh-Pt
- PtRh-Pt 30/6

Strahlungspyrometer
allgemein

- Gesamtstrahlungspyrometer
- Teilstrahlungspyrometer
- Fotoelektrische Pyrometer
- Farbpyrometer

Segerkegel

Temperaturmeßfarben

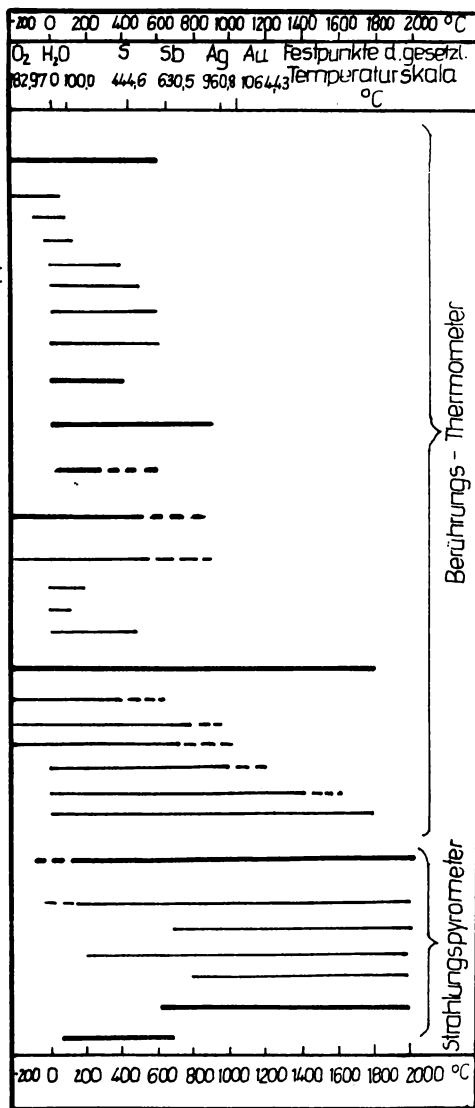


Bild 2: Anwendungsbereiche der wichtigsten Temperaturmeßrichtungen

Aus den Gl. (3) und (4) bzw. (5) läßt sich erkennen:

1. Ein Fühler entzieht der Meßstelle um so mehr Wärme, je größer seine Masse und spezifische Wärme ist.
2. Der Wärmeübergang erfolgt nach Gl. (3) um so schneller, je größer die Wärmeübergangszahl α und die Fläche A des Fühlers ist, wobei die Wärmeübergangszahl eine Funktion des den Fühler umgebenden Mediums und dessen Geschwindigkeit ist.

Aus diesen Feststellungen lassen sich Forderungen hinsichtlich der Konstruktion eines Temperaturfühlers ableiten: kleine Masse, geringe spezifische Wärme und große Fläche! Diese Forderungen können jedoch nicht widerspruchsfrei erfüllt werden.

Es soll nun noch untersucht werden, welchen zeitlichen Verlauf das vom Temperaturfühler abgegebene Signal T_2 aufweist. Vereinfachend wird angenommen, daß $T_1 > T_2 = T_A$ zum Zeitpunkt Null des Eintauchens ist. Nach Gl. (3) gilt mit $Q_2 = Q$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T = \alpha \cdot A (T_1 - T_2). \quad (6)$$

Da A eine konstante Größe ist und α bei stationären Betriebsbedingungen ebenfalls konstant ist, kann man beide zu einem Faktor

$$C = \alpha \cdot A$$

zusammenfassen:

$$\frac{dQ_2}{dt} = C (T_1 - T_2). \quad (7)$$

Aus Gl. (4) geht wiederum hervor, daß die gesamte aufgenommene Wärme

$$Q_2 = m \cdot C (T_1 - T_A)$$

ist und damit eine differentielle Wärmezunahme gleich

$$dQ_2 = m \cdot c \cdot dT_2 \quad (8)$$

sein muß.

Setzt man Gl. (8) in die Gl. (7) ein und erfaßt man die Konstanten m, c und C in einer neuen Konstanten

$$C^* = \frac{C}{m \cdot c},$$

so ergibt sich

$$\frac{dT_2}{dt} = C^* (T_1 - T_2). \quad (9)$$

Diese Gleichung zeigt anschaulich, daß der Temperaturanstieg des Fühlers in der Zeiteinheit nicht linear, sondern proportional zur noch existierenden Temperaturdifferenz ist. Die Gl. (9) stellt eine Differentialgleichung 1. Ordnung dar, die nach bekannten Lösungsverfahren für die angegebenen Bedingungen folgendes Ergebnis liefert:

$$T_2 - T_A = (T_1 - T_A)(1 - e^{-C^* t}), \quad (10)$$

wobei nach den vorangegangenen Darstellungen

$$C^* = \frac{\alpha \cdot A}{m \cdot c}$$

ist und die Einheit 1/s besitzt¹⁾.

Demzufolge stellt der Ausdruck $\frac{1}{C^*}$ eine Zeit dar, die als Zeitkonstante τ bezeichnet wird:

$$T_2 - T_A = (T_1 - T_A)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (11)$$

Die grafische Darstellung des Übergangsverhaltens zeigt Bild 3.

Der in Bild 3 dargestellte Zusammenhang zeigt, daß das Signal des Temperaturfühlers streng genommen erst nach unendlich langer Zeit der wirklich vorhandenen Temperatur entspricht. Zur Zeit $t = \tau$ ist der Wert

$$T_2 - T_A = (T_1 - T_A)(1 - e^{-1})$$

$$T_2 - T_A = 0,63 (T_1 - T_A) \text{ erreicht.}$$

=====

1)

$$\left[\frac{\alpha \cdot A}{m \cdot c} \right] = \frac{\frac{J}{m^2 K s} \cdot m^2}{kg \cdot \frac{J}{kg K}} = s^{-1}$$

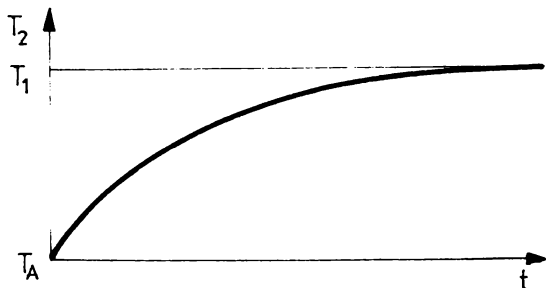


Bild 3: Zeitlicher Verlauf des Fühlertemperatursignals beim Eintauchen in ein Medium mit der Temperatur T_1

Es muß die Zeit $t = 4\tau$ zwischen dem Eintauchen des Meßfühlers in das Medium mit der Temperatur T_1 und dem Bestimmen des Fühlersignals vergehen, wenn eine annähernd richtige Abbildung der Temperatur T_1 erfolgen soll. Die Temperatur des Meßfühlers T_2 ist zu diesem Zeitpunkt

$$T_2 = (T_1 - T_A)(1 - e^{-4}) + T_A$$

$$T_2 = (T_1 - T_A) \cdot 0,98 + T_A.$$

=====

In der Technik ist es auch üblich, die Zeiten $\tau_{0,5}$ oder $\tau_{0,9}$ als Zeitkonstanten anzugeben, nach denen 50 % bzw. 90 % der Differenz zwischen der Temperatur des Mediums und der des Meßfühlers ausgeglichen sind. Zur Veranschaulichung sind diese Verhältnisse im Bild 4 grafisch dargestellt.

Die Zeitkonstante τ hängt nicht nur von den Konstruktionsparametern τ , sondern auch von der Strömungsgeschwindigkeit und der Art des Mediums ab. Sie muß experimentell für den jeweiligen Anwendungsfall bestimmt werden.

Die hier abgeleitete Beziehung zwischen angezeigter Temperatur und Zeit stellt eine Idealisierung bzw. Annäherung an das reale Übergangsverhalten dar. Das kompliziertere reale Übergangsverhalten ergibt sich aus der Tatsache, daß auch der einfache Temperaturfühler ein Mehrspeichersystem ist.

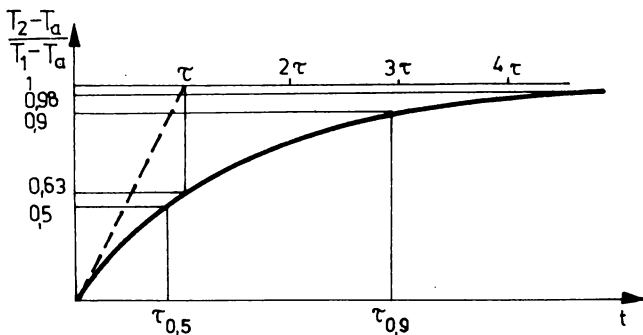


Bild 4: Darstellung der Zeitkonstanten τ , $\tau_{0,5}$ und $\tau_{0,9}$ am zeitlichen Verlauf des Fühlertemperatursignals

Die Verzögerung zwischen der Temperaturanzeige und der wirklichen Temperaturänderung an der Meßstelle kann durch die Zeitkonstanten τ , $\tau_{0,5}$ und $\tau_{0,9}$ charakterisiert werden. So ist die zur Zeit $t = \tau_{0,9}$ nach dem Auftreten eines Temperatursprungs an einem Meßfühler zu ermittelnde Temperaturänderung gegenüber dem Anfangswert der Fühlertemperatur gleich 90 % des tatsächlichen Wertes.

A u f g a b e n

- A 1. Welche Folgen hat eine Messung an Temperaturmeßstellen mit kleiner Wärmekapazität?
- A 2. Von welchen Größen ist die zeitliche Änderung des von einem Meßfühler abgegebenen Temperatursignals abhängig?
- A 3. Wie lange muß mit der Ablesung gewartet werden, wenn eine Abweichung von 5 % zugelassen ist?

2. Berührungsthermometer

2.1. Mechanische Berührungsthermometer

2.1.1. Flüssigkeitsausdehnungsthermometer

Das Wirkprinzip von Flüssigkeitsausdehnungsthermometern beruht auf der unterschiedlichen Ausdehnung von Glas und thermometri-

scher Flüssigkeiten bei Temperaturänderung.

Mit Flüssigkeiten gefüllte Glasthermometer sind die einfachsten und gebräuchlichsten Meßgeräte für Temperaturen von etwa -200 bis $+580$ °C. Für höhere Temperaturen (bis ca. $+750$ °C, selten bis $+1000$ °C) werden Thermometer aus Quarz verwendet (vgl. Bild 2).

Es werden benetzende und nicht benetzende thermometrische Flüssigkeiten verwendet. Nicht benetzende thermometrische Flüssigkeiten (z. B. Quecksilber) sind ab $-38,9$ °C (Schmelzpunkt von Quecksilber) einsetzbar /2/ /3/ /4/. Bis ca. 250 °C wird der Kapillarraum über dem Quecksilber zur Vermeidung einer Oxydation evakuiert (luftleer gepumpt). Bei höheren Temperaturen besteht die Möglichkeit, daß Quecksilber verdampft. Um dies zu vermeiden, wird der Raum über dem Quecksilberfaden mit einem inerten Gas (z. B. Stickstoff) gefüllt. Zur Messung tieferer Temperaturen werden organische benetzende Flüssigkeiten (z. B. Pentan, Toluol, Ethylalkohol, Amylbenzolat; vgl. Bild 2) verwendet. Zur besseren Ablesbarkeit werden diese Flüssigkeiten gefärbt. Derartige Thermometer sind gegenüber Quecksilberthermometern träger, und ihre Fehlergrenzen sind größer. Die Anzeige der Temperatur erfolgt praktisch nur durch die Längenänderung Δl des Flüssigkeitsfadens, da die Querschnittsfläche A der Kapillare infolge des geringen Ausdehnungskoeffizienten für Glas als konstant angenommen werden kann.

$$\Delta l = \frac{\gamma \cdot V_0}{A} \cdot \Delta \vartheta \quad (12^+)$$

$$\Delta l = f(\Delta \vartheta)$$

- A Querschnittsfläche der Kapillare
 γ relativer Volumenausdehnungskoeffizient (Differenz von Flüssigkeit und Glas)
 $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz
 Δl Längenänderung des Flüssigkeitsfadens
 V_0 Ausgangsvolumen

Volumenausdehnungskoeffizient γ , Querschnittsfläche A und Ausgangsvolumen V_0 sind konstruktive Parameter (Gerätekonstanten).

Durch geometrische Veränderung lassen sich Flüssigkeitsausdehnungsthermometer unterschiedlicher Meßbereiche und gewünschter Empfindlichkeit herstellen.

A u f g a b e n

A 4. Definieren Sie die Empfindlichkeit für Flüssigkeitsausdehnungsthermometer!

A 5. Überlegen Sie, wie die Empfindlichkeit erhöht werden kann!

Bei Flüssigkeitsausdehnungsthermometern werden folgende Bauteile unterschieden (vgl. Bild 5):

- Thermometergefäß - ist der Temperaturfühler, der den wesentlichen Teil der thermometrischen Flüssigkeit enthält.
- Umhüllungsrohr - ist das Glasrohr, das die Thermometerkapillare und den Skalenträger umhüllt.
- Thermometerkapillare - ist der gesamte, mit dem Thermometergefäß verbundene, kapillare Teil (einschließlich aller Erweiterungen).
- Meßkapillare - ist der Teil der Thermometerkapillare, an dem der Stand des Meniskus der Flüssigkeit mit Hilfe einer Skale abgelesen wird.
- Expansionserweiterung - ist eine am Ende der Kapillare angebrachte Erweiterung, die ein Erwärmen des Thermometers über den Anzeigebereich hinaus gestattet.
- Oberteil - umfaßt die Meßkapillare und Skale (in der Regel nicht eintauchend).
- Unterteil - umfaßt das Gefäß und die Verbindungskapillare.
- Thermometerverschluß - ist die zum Verschließen des Umhüllungsrohres angewendete Form (mit Ring, Kopf, Kappe oder ähnliches).
- Skalenträgerbefestigung - ist die Verbindung zwischen Skalenträger und Umhüllungsrohr (z. B. mit angeschmolzenem Glasstift, mit Federstütze oder Stopfen).

Entsprechend der Anwendung werden verschiedene Bauformen unterschieden:

- Laborthermometer (meist ohne metallisches Schutzgehäuse),
- Betriebsthermometer, oft Maschinenthermometer genannt (mit

metallischem Schutzgehäuse).

Flüssigkeitsausdehnungsthermometer werden als Einschlußthermometer (Form E) und Stabthermometer (Form S) gefertigt. Beim Einschlußthermometer sind Meßkapillare und Skale in ein Hüllrohr eingeschmolzen. Beim Stabthermometer bilden Meßkapillare und Skale eine konstruktive Einheit. Bild 5 zeigt schematisch Aufbau und konstruktive Hauptparameter eines Sortiments von Laborthermometern des VEB Thermometerwerk Geraberg. Spezielle Ausführungen sind z. B.

- Laborthermometer mit Kegelschliff,
- Laborthermometer mit Federstütze,
- Einstellthermometer nach Beckmann,
- meteorologische Thermometer,
- Thermometer für gewerbliche Zwecke usw.

Maschinenthermometer sind Flüssigkeitsausdehnungsthermometer in korrosionsfesten metallischen Schutzgehäusen. Sie werden in Betrieben zur Temperaturmessung in Schmelzen, Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen im Temperaturbereich von -90°C bis $+600^{\circ}\text{C}$ bei Nenndrücken bis 0,1 MPa (Form A), 0,6 MPa (Formen B und C) und für Sonderbauformen bis 4 MPa (Form C kombiniert) angewendet. Maschinenthermometer haben in der

Form A keine Befestigungsmittel; $l_1 = 63 \dots 2500 \text{ mm}$,
Form B Einschraubgewinde M 27 x 2; $l_1 = 63 \dots 1000 \text{ mm}$,
Form C Überwurfmutter M 27 x 2; $l_1 = 88 \dots 425 \text{ mm}$,
Form C kombiniert; doppeltes Schutzrohr mit Einschraubgewinde M 27 x 2.

Kontaktthermometer sind ungeschützte (für Laboreinsatz) und geschützte (für Betriebseinsatz) Einschluß-Quecksilber-Gas-Thermometer mit einstellbarem oder nichteinstellbarem Schaltkontakt für Steuerungszwecke. Sie werden für Temperaturüberwachungen im Bereich von -58°C bis $+600^{\circ}\text{C}$ hergestellt und können Gleich- oder Wechselspannungen bis 250 V bei Stromstärken bis 30 mA schalten.

Bild 6 zeigt schematisch den Aufbau nichteinstellbarer und einstellbarer Kontaktthermometer des VEB Thermometerwerk Geraberg.

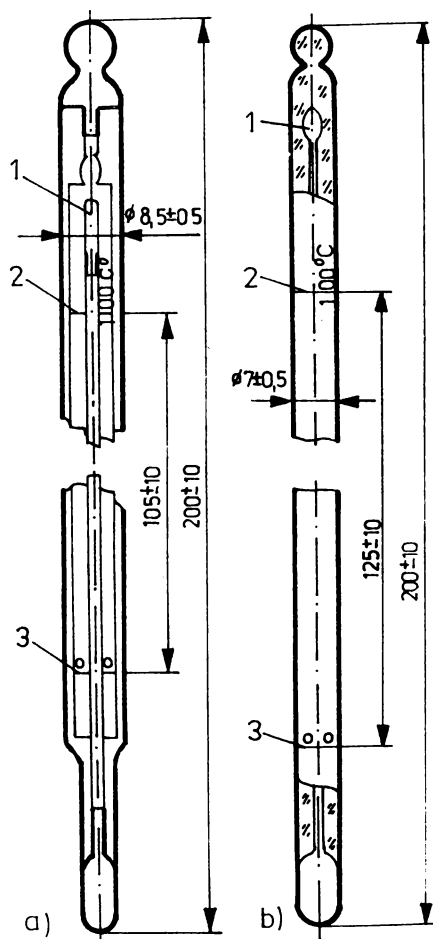


Bild 5: Laborthermometer

a) Form E Einschlußthermometer

b) Form S Stabthermometer

1 Expansionserweiterung; 2 obere Grenze des Meßbereichs
3 untere Grenze des Meßbereichs

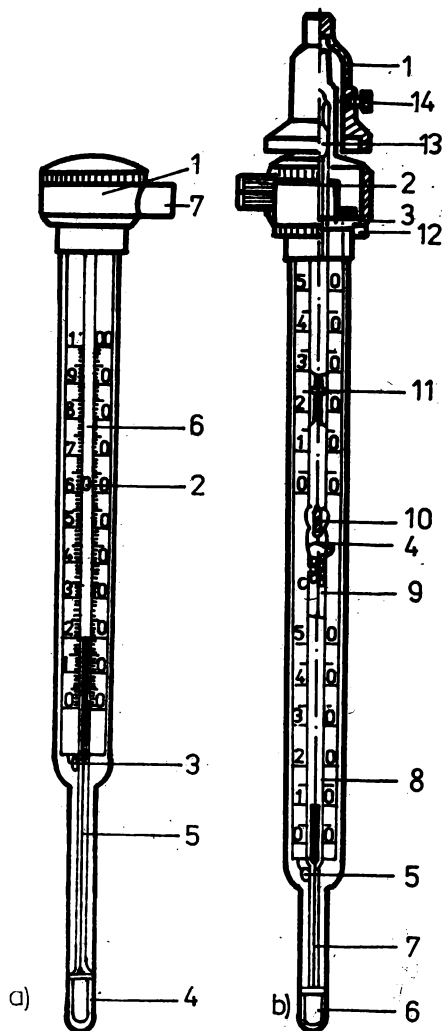


Bild 6: Kontaktthermometer

a) Form NE nicht einstellbar

b) Form E einstellbar

1 Anschlußkappe/Einstellmagnet; 2 Kontakt/Anschlußstück;
3 Anschlußkontakt/Kappe; 4 Gefäß/Kontakt; 5 Kapillare/Anschluß-
kontakt; 6 Kapillare/Gefäß; 7 Anschlußstück/Verbindungs-kapil-
lare; 8 Meßkapillare; 9 bis 14 Kontaktdraht mit mechanischer
Verbindung

2.1.2. Federthermometer

Das Wirkprinzip von Federthermometern beruht auf der Druckänderung von Flüssigkeiten und Dämpfen in geschlossenen Systemen bei Temperaturänderung.

Flüssigkeits- und Dampfdruck-Feder-Thermometer werden zur Fernanzeige von Temperaturen eingesetzt. Sie sind ähnlich einem Manometer aufgebaut, da die Anzeige der Temperatur durch die Druckänderung Δp des thermometrischen Mediums (Flüssigkeit oder Dampf) bewirkt wird.

$$\Delta p = \gamma \cdot p_0 \cdot \Delta \vartheta \quad (13)$$

$$\Delta p = f(\Delta \vartheta)$$

$\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz

γ Volumenausdehnungskoeffizient

p_0 Ausgangsdruck

Δp Druckänderung im Federthermometer

Federthermometer gestatten die Anzeige der Temperatur auf Zeigerskalen am Meßort (starre Verbindung) oder in Entfernung bis 40 m (Kapillarfernleitung; vgl. Bild 7).

Sie sind preiswert, arbeiten ohne Hilfsenergie und bringen relativ große Stellkräfte auf, so daß sie mit Zusatzeinrichtungen auch für Steuerzwecke eingesetzt werden können.

Wesentliche Bauteile der Federthermometer sind:

- Temperaturfühler (mit Flüssigkeit, Dampf oder Gas gefüllt),
- Kapillarleitung,
- manometrischer Anzeiger.

Die Arten der Federthermometer unterscheiden sich prinzipiell durch die Phase des thermometrischen Meßstoffes (Flüssigkeit, Dampf oder Gas). Die einzelnen Ausführungen unterscheiden sich nach der Art der Weiterverarbeitung des Federweges, des Meßstoffes, der Kapillarlänge und der Einbauart.

Bild 7 zeigt schematisch den Aufbau eines Flüssigkeitsfederthermometers. Die Einsatzbereiche liegen für Flüssigkeits-Feder-Thermometer (Quecksilber, organische Flüssigkeiten) im Bereich von -50°C bis $+600^{\circ}\text{C}$. Die Anzeige ist linear. Die

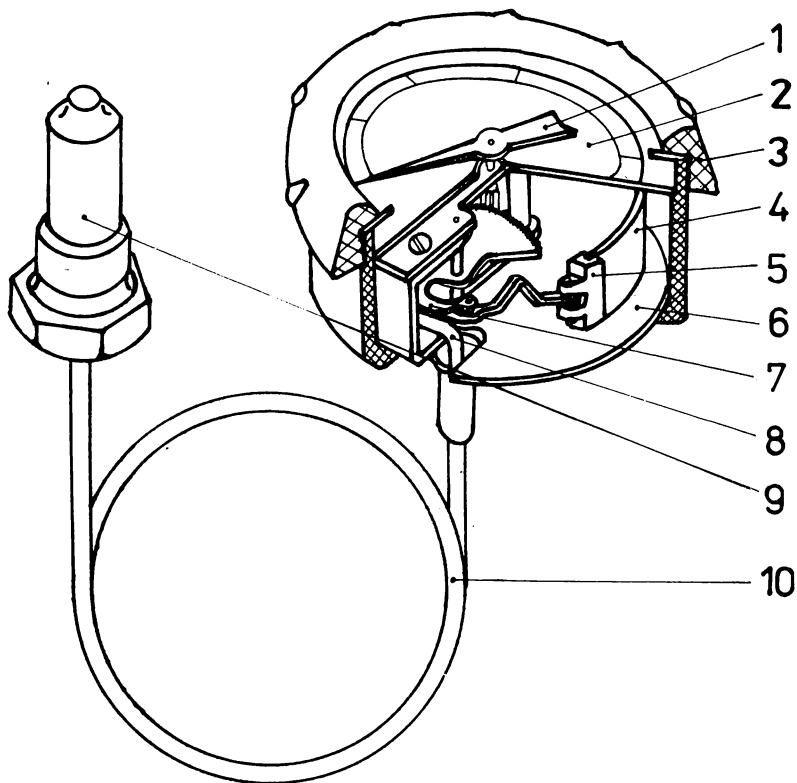


Bild 7: Federthermometer

- 1 Zeiger,
- 2 Skalenblatt,
- 3 Verschlußring des Gehäuses,
- 4 Bourdonfeder,
- 5 Federendstück,
- 6 Grundplatte,
- 7 Übersetzungsgetriebe,
- 8 Kapillarrohr,
- 9 Temperaturmeßfühler,
- 10 Fernleitung

zulässigen Abweichungen entsprechen überwiegend den Klassen 1 bis 2,5.

Bei Temperaturmessungen mit Dampfdruck-Feder-Thermometern beruht das Wirkprinzip auf der Dampfdruckänderung (auch als Dampfspannung oder Tension bezeichnet).

Da die Druckänderung im geschlossenen System bei höheren Temperaturen zunimmt, ist die Skale nicht linear. Äußerlich und in den wesentlichen Bauteilen unterscheiden sich Dampfdruck-Feder-Thermometer nicht von Flüssigkeits-Feder-Thermometern.

2.1.3. Metallausdehnungsthermometer

Das Wirkprinzip von Metallausdehnungsthermometern beruht auf der unterschiedlichen Ausdehnung zweier Feststoffe (Metalle oder Nichtmetalle) bei Temperaturänderung. Das Maß für die Temperatur ist die Längendifferenz Δl .

$$\Delta l = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot l_0 \cdot \Delta \vartheta \quad (14)$$

$$\Delta l = f(\Delta \vartheta)$$

α_A Längenausdehnungskoeffizient des Stoffes A

α_B Längenausdehnungskoeffizient des Stoffes B

$\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz

l_0 Ausgangslänge (richtiger Ausgangslängendifferenz)

Δl Längenänderung am Metallausdehnungsthermometer

Bild 8 zeigt das Ausdehnungsverhalten ausgewählter Feststoffe bei Temperaturerhöhung. Die temperaturabhängige Ausdehnung ist nicht immer linear.

Auf Grund des einfachen Aufbaus, hoher Stellkräfte und der Einsatzmöglichkeiten bei Temperaturen bis 1000 °C werden Stabausdehnungsthermometer häufig mit pneumatischen oder hydraulischen Reglerteilen kombiniert (z. B. für Frischdampfthermostatregelungen oder an Kesseln in der Chemieindustrie).

Eine weitere Bauform von Metallausdehnungsthermometern sind die Bimetallthermometer. Sie bestehen aus zwei aufeinandergepreßten Metallstreifen. Die Materialien dieser Metallstreifen haben (vgl. Stabausdehnungsthermometer) verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten. Verbreitet sind Messing (Kupfer-Zink-Legierung) und Invar (Eisen-Nickel-Legierung). Durch die Temperaturänderung wird eine Auslenkung bewirkt. Diese Auslenkung kann durch eine spiralförmige Aufwicklung dünner Bimetall-Bleche erhöht werden.

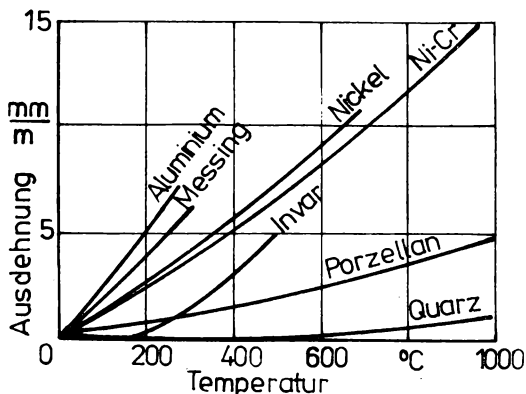


Bild 8: Ausdehnung ausgewählter Feststoffe bei Temperaturerhöhung

2.2. Elektrische Berührungsthermometer

2.2.1. Widerstandsthermometer

Das Wirkprinzip von Widerstandsthermometern beruht auf der Veränderung des elektrischen Widerstandes von Leitern in Abhängigkeit von der Temperatur.

Unter Widerstandsthermometern im engeren Sinne werden Thermometer auf der Basis metallischer Widerstände (vorzugsweise Platin, auch Nickel) verstanden. Außer diesen erlangen Widerstandsthermometer auf der Basis von Halbleitern immer größere Bedeutung (vgl. Abschn. 2.2.3.).

Der Zusammenhang zwischen dem Widerstand und der Meßtemperatur ist werkstoffabhängig und nicht durchgehend linear. Der Verlauf der Funktion $R = f(\vartheta)$ ist für Metalle näherungsweise durch folgende Gleichung darstellbar:

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad \text{im Bereich } 0 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta \cdot \Delta\vartheta^2) \quad \text{im Bereich } 0 \dots 630 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta \cdot \Delta\vartheta^2 + \gamma \cdot \Delta\vartheta^3) \quad \text{im Bereich } {}^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

-190 ... 0

R_0	Widerstand bei 0 °C
R_{ϑ}	Widerstand bei Meßtemperatur
$\Delta\vartheta$	Temperaturänderung
α, β, γ	Temperaturkoeffizient

Während der Nennwert R_0 von 100 Ω bei 0 °C bevorzugt international angewendet wird, sind die Grundwerte für Platin-Meßwiderstände und die zulässigen Abweichungen international nicht einheitlich.

Die Grundwerte für Meßwiderstände sind gemäß TGL 39438 (früher TGL 0 - 43760) festgelegt und der Tafel 6, Seite 35, zu entnehmen. Für die praktische Anwendung sind diese Grundwerte von Bedeutung, z. B. bei Prüfarbeiten. Die mittleren Temperaturbeiwerte betragen im Bereich von 0 °C bis 100 °C für

Platin 3,85 bis $3,862 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,

Nickel 6,17 bis $6,240 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Widerstandsthermometer (Standardausführungen) finden in folgenden Temperaturbereichen Anwendung:

Platin -200 °C bis +550 °C,

Nickel -60 °C bis +180 °C.

Der Grundstromkreis für Temperaturmessungen mit dem Widerstandsthermometer besteht aus dem Meßwiderstand R_{ϑ} , einer Meßbrücke, einer Spannungsquelle und einem Anzeigeinstrument. Dieser Grundstromkreis ist im Bild 9 - Beilage (Zweileiter-schaltung) dargestellt. Zur weitestgehenden Vereinheitlichung der einzelnen Baugruppen und Geräte gilt folgendes:

- Es ist ein Abgleich des Widerstandes der Zuleitungen vorzunehmen (mittels Abgleichwiderstand R_A).
- Ein Teil der Meßbrücke, d. h. die Widerstände R_2 bis R_4 , sind mit dem Anzeigeinstrument zu einem Gerät zusammengefaßt.
- Die Spannungsversorgung (Quelle E mit Einstellung) wird üblicherweise mit Halbleiterwiderstandsgleichrichtern (Eingang 220 V W₃, Ausgang 6 V G₅) realisiert.

Gerätetechnisch ergibt sich dann die im Schaltplan des Bildes 10 dargestellte Zusammenschaltung.

Widerstandsthermometer bestehen aus

- dem Meßeinsatz mit dem Meßwiderstand (als Fühler aus Widerstandsdraht) und Widerstandsträger sowie Zusatzwiderstand, Einsatzrohr (auch inneres Schutzrohr genannt) und Thermometeranschlüssen,
- dem Schutzrohr sowie
- dem Anschlußkopf für den geschützten Anschluß der Fernleitungen.

Bild 10 (Beilage) zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Widerstandsthermometers in Schnittdarstellung, den darin befindlichen Meßeinsatz und den vereinfachten Prinzipschaltplan.

Die Meßschaltungen für Temperaturmessungen mit Widerstandsthermometern werden entsprechend den Einsatz- und gerätetechnischen Bedingungen und den Forderungen an die Genauigkeit ausgewählt. Grundsätzlich wird unterschieden in

- Meßschaltungen nach dem Ausschlagverfahren (auch offene Meßschaltungen genannt) und
- Meßschaltungen nach dem Kompensationsverfahren (auch geschlossene Meßschaltungen genannt).

Meßschaltungen nach dem Ausschlagverfahren werden mit Kreuzspul- und Drehspulinstrumenten in Zwei- und Dreileiterschaltungen betrieben. Die einfachste Schaltung ist die Zweileiterschaltung nach dem Ausschlagverfahren mit einem Drehspulinstrument (Grundstromkreis). Die vom Drehspulinstrument G angezeigte Stromstärke I der Brückendiagonale ist ein Maß für die interessierende Temperatur ϑ des Meßwiderstandes R_{ϑ} . Da die Anzeige des Drehspulinstrumentes auch von der Speisespannung abhängig ist, muß diese konstant gehalten werden.

Als Fehler wirken sich aus:

- Abgleichfehler,
- Temperaturänderungen der Zuleitungen,
- Nichtlinearität in der Meßbrücke und Toleranzen der Brückewiderstände R_2 bis R_4 ,

- Eigenerwärmung des Meßwiderstandes R_g ,
- Schwankungen der Versorgungsspannung,
- Fehler des Drehspulinstrumentes.

Der Umfang der Fehlermöglichkeiten verdeutlicht, daß diese Schaltungsvariante wenig Anwendung findet.

In der Dreileiterschaltung wirken sich die Widerstandsänderungen durch Temperaturschwankungen der Zuleitungen auf beide Brückenarme aus. Somit wird diese Fehlermöglichkeit beseitigt.

Wesentlich breitere Anwendung finden Meßschaltungen mit Kreuzspulinstrumenten (auch Quotientenmesser genannt). Hierbei haben Schwankungen in der Speisespannung keinen Einfluß auf die Anzeige. Bei diesen Instrumenten wirken die Drehmomente der sich kreuzenden, starr gekoppelten Wicklungen gegeneinander. Der Zeigerausschlag ist proportional dem Quotienten der Stromstärken, die in den Stromkreisen 1 (bestehend aus Spule 1, R_V , R_1 und Quellwiderstand R_N) und 2 (bestehend aus Spule 2, R_V , R_A , R_3 , R_2 und R_N) fließen. Nur der Meßwiderstand R_g ist temperaturabhängig. Bei Meßschaltungen mit Kreuzspulinstrumenten treten noch auf:

- Abgleichfehler,
- Temperaturänderungen der Zuleitungen (nur bei Zweileiterschaltungen),
Abweichungen des Gesamtwiderstandes R_A und Leitungswiderstände von 1Ω können eine Fehlanzeige von 2,5 K hervorrufen.
- Eigenerwärmung des Meßwiderstandes R_g , bedingt durch den Meßstrom. Erwärmungsfehler hängen ab vom Quadrat der Stromstärke, dem Aufbau des Thermometers und den Wärmeübergangsbedingungen und können bei Meßstromstärken von 10 mA im Bereich von 0,02 bis 1 K liegen.

Für präzise Messungen sind Kompensationsverfahren anzuwenden, wobei in Spannungskompensationsverfahren und Brückennullverfahren unterschieden wird. Bei der Spannungskompensation wird durch die Temperatur des Meßwiderstandes bei bekannter Stromstärke eine Meßspannung U_X erzeugt, welche durch eine gleich

große Gegenspannung U_N kompensiert wird. Bei dem Brückennullverfahren wird der Brückenwiderstand so lange verstellt, bis die Brückendiagonale stromlos ist. Bei Kompensationsverfahren wird somit leistungslos gemessen, d. h., ohne daß ein Meßstrom fließt. Dadurch werden Erwärmungsfehler vermieden.

Die technischen Ausführungen der Widerstandsthermometer unterscheiden sich in

- der Gestaltung der Meßwiderstände,
- den Eintauchtiefen,
- den Schutzrohrwerkstoffen und -abmessungen,
- den Befestigungsmöglichkeiten,
- der Gestaltung der Leiteranschlüsse.

Die Meßwiderstände werden in den Ausführungen einfach (Form E) und doppelt (Form D) hergestellt /5/.

Die Eintauchtiefen sind entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall zu bestimmen. Hierbei sind die standardisierten Meßeinsatzlängen zwischen 275 mm bis 2015 mm zu beachten.

Schutzrohrwerkstoffe und -abmessungen sind entsprechend den jeweiligen thermischen und mechanischen Belastungen durch das Medium zu bestimmen. Hierfür liegen Belastungsdiagramme vor, mit deren Hilfe unter Beachtung der Betriebstemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit die Einsatzmöglichkeit des jeweiligen Schutzrohres (Eintauchtiefe, Werkstoff) geprüft werden kann.

Bei Schutzrohrabmessungen ist der Durchmesser des Meßeinsatzes (8 mm für Typ 360, 6 mm für Typ 370) zu beachten. Als Befestigungsmöglichkeiten werden Überwurfmuttern oder Einschraubverschraubungen M 27 x 2 oder Anschlagflansche gewählt.

Für Zusatzschutzrohre werden noch Einschweiß- oder Flanschmontagen angewendet. Der Anschluß der Zuleitungen wird in Anschlußköpfen aus Aluminium oder Plaste vorgenommen. Für besondere Einsatzbedingungen werden im Rahmen von Standard-Widerstandsthermometern gefertigt:

- schwingfeste Ausführungen (Kennzeichen Sch) für Anwendungsfälle unter starken Erschütterungen oder hochfrequenten Schwingungen (s. a. TGL 9200/03),

- explosionsgeschützte Ausführungen (Kennzeichen Ex) für den Einsatz in explosionsgefährdeten Betriebsstätten; in der Schutzart (Ex)s T 1 bis T 5,
- Ausführungen mit der DSRK-Zulassung (DSRK-Zulassung der Deutschen Schiffs-Revision und -Klassifikation) für Anwendung unter klimatisch veränderten Bedingungen und besonderen Belastungen.

Neben dem Standard-Sortiment und den darin enthaltenen Ausführungen Sch, Ex und DSRK werden noch Spezialausführungen hergestellt, z. B.:

- kombinierte Temperaturfühler Typ 341 KT als Kombination von Widerstandsthermometern mit Flüssigkeitsausdehnungsthermometern (mit und ohne Kontakt); VEB Thermometerwerk Geraberg,
- Mantel- und Einsteckwiderstandsthermometer, Typenreihe S 700 und S 800, für extreme Einbautiefen und Befestigungsprobleme sowie für Kunststoffverarbeitungs- und Spezialmaschinen; Außendurchmesser 3 mm bis 8 mm, Länge bis 15 m; VEB Spezialmeßgeräte Leipzig,
- Präzisions-Platin-Widerstandsthermometer, Modell 78, für Präzisionsmessungen und Prüfungen im Bereich von 90 K bis 903 K, (-183°C bis 630°C); VEB Thermometerwerk Geraberg.

Bild 11 zeigt ausgewählte Widerstandsthermometer in Standard- und Spezialausführung mit Angabe der wichtigsten Abmessungen.

Die für Inbetriebnahme- und Revisionsmessungen erforderlichen Grundwerte für Widerstandsthermometer sind Tafel 6 zu entnehmen.

2.2.2. Thermoelemente

Das Wirkprinzip von Thermoelementen beruht auf der Entstehung einer Spannung, wenn zwei verschiedene elektrische Leiter leitend miteinander verbunden werden und zwischen verbundenen und offenen Leiterenden eine Temperaturdifferenz besteht.

Zur Erläuterung dieses Wirkprinzips, ausgehend vom geschlossenen Element, gilt folgendes:

Wenn zwei Leiter ungleichen Materials an zwei Stellen mitein-

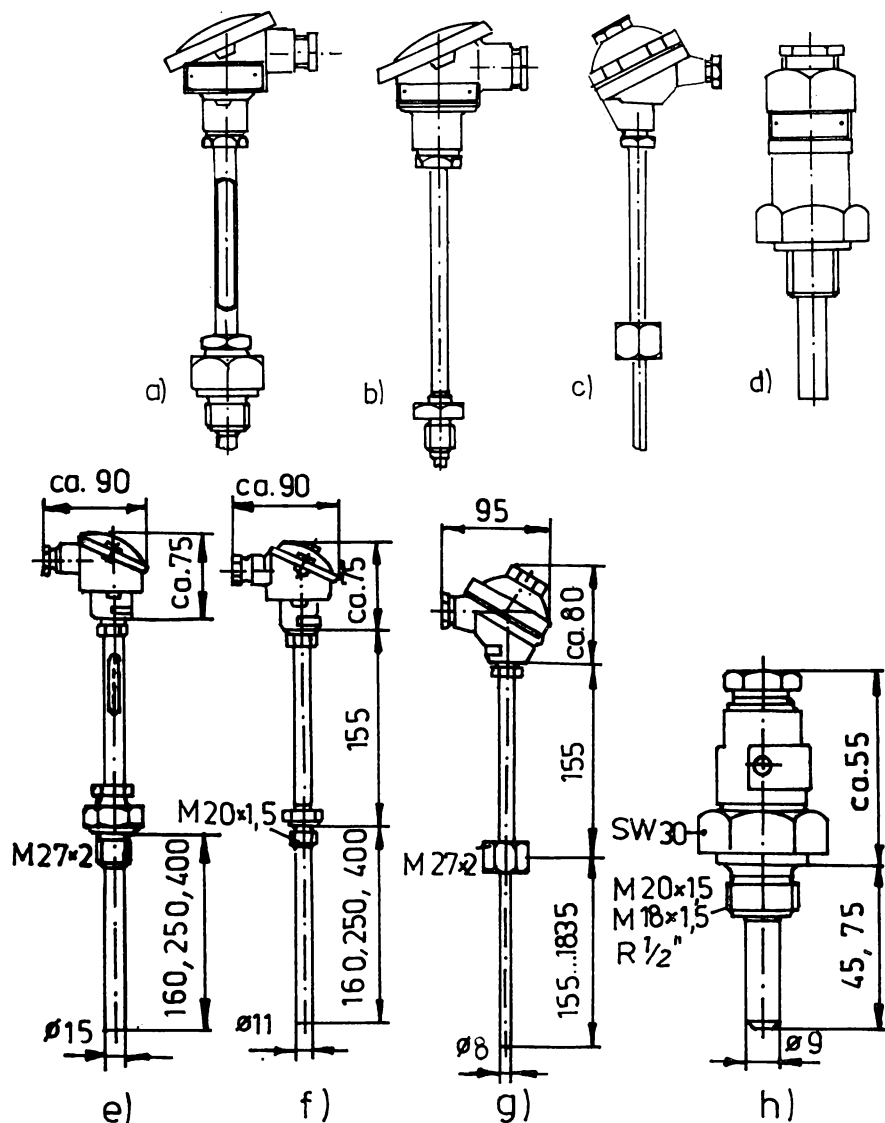


Bild 11: Widerstandsthermometer in Standard- und Spezialausführung

- a), e) kombinierter Temperaturfühler Typ 341 KT
b), f) Widerstandsthermometer Typ 354
c), g) Widerstandsthermometer Typ 365
d), h) kleines Einschraub-Widerstandsthermometer Typ 380

Tafel 6: Grundwerte für Widerstandsthermometer (Ausgewählte Werte aus TGL 39438 als Widerstandsverhältnis) /6/

$\frac{R}{R_0}$ °C	Kupfer	Nickel	Platin
-200	-	-	0,1849
-150	-	-	0,3971
-100	-	-	0,6025
- 50	0,7870	0,742	0,8031
0	1,0000	1,000	1,0000
+ 50	1,2130	1,291	1,1940
+100	1,4260	1,616	1,3850
+150	1,6390	1,987	1,5545
+200	-	-	1,7584
+250	-	-	1,9407
+300	-	-	2,1202
+350	-	-	2,2967
+400	-	-	2,4704
+450	-	-	2,6411
+500	-	-	2,8090
+550	-	-	2,9739

ander verbunden werden und die Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen aufweisen, so fließt in diesem Leiterkreis ein Thermostrom. Öffnet man den Kreis, so tritt an der Unterbrechungsstelle eine Urspannung auf, die auch Thermospannung genannt wird. Dieser Effekt, der 1822 von Seebeck entdeckt wurde, ist die Grundlage der thermoelektrischen Temperaturmessung. Durch das Zusammenfügen der beiden Leiter ist ein Thermoelement entstanden.

Die Thermospannung E_{12} ist vom Material der beiden Leiter und von der Temperatur der Verbindungsstellen abhängig. Die Temperaturverteilung in den Leitern spielt dabei keine Rolle. Die Thermospannung E_{12} zwischen den beiden Verbindungsstellen I und II bei zwei unterschiedlichen Leitern 1 und 2 (Bild 12) ergibt sich durch Integration der differentiellen Thermo-

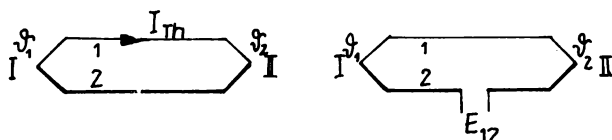


Bild 12: Geschlossener und geöffneter thermoelektrischer Stromkreis

spannung e_{12} :

$$E_{12} = \int_{T_I}^{T_{II}} e_{12}(T) dT. \quad (18)$$

Die differentielle Thermospannung e_{12} ist die Thermospannung je K, die sich zwischen zwei Leitern ergibt.

Diese differentielle Thermospannung ändert sich mit dem Temperaturpotential, d. h., die Zunahme der Thermospannung E_{12} erfolgt nichtlinear. Sie ist aber eine stetige Funktion der Temperatur. Anstelle der Gl. (18), bei der die Thermospannung E_{12} aus der differentiellen Thermospannung e_{12} erklärt wird, läßt sich auch die Beziehung

$$E_{12} = K_1 \cdot \vartheta + K_2 \cdot \vartheta^2$$

verwenden. Diese Näherungsbeziehung erklärt die Thermospannung als Funktion der Temperaturdifferenz.

Für näherungsweise Betrachtungen könnte man e_{12} T als Konstante ansehen, so daß sich die Thermospannung zu

$$E_{12} = \int_{T_I}^{T_{II}} e_{12} dT = e_{12} \int_{T_I}^{T_{II}} dT = e_{12}(T_{II} - T_I) \quad (19)$$

ergeben würde. In erster Näherung ist die Thermospannung also proportional der Temperaturdifferenz.

Zur Vereinheitlichung technischer Ausrüstungen werden standardisierte Materialkombinationen angewendet. Solche Thermopaare sind Kupfer-Konstantan, Eisen-Konstantan, Nickelchrom-

Nickel und Platinrhodium-Platin. Für die Reihenfolge der Bezeichnung für Thermopaare gilt: Pluspol (z. B. Kupfer) - Minuspol (z. B. Konstantan). Die Spannungswerte dieser Thermopaare (Thermoelemente) sind gemäß TGL 39440 (früher TGL 0-43710) festgelegt und in der Tafel 7 aufgeführt.

Zu beachten ist, daß die Thermopaare, nicht aber die Zusammensetzungen der Legierungen der Thermopaardrähte international standardisiert sind. Es ist deshalb nicht zulässig, Drähte verschiedener Hersteller zu Thermopaaren zu vereinen. Der Grundstromkreis für Temperaturmessungen mit Thermoelementen besteht aus dem Thermoelement und dem Anzeigegerät. An den Anschlußstellen des Thermoelementes ist entsprechend dem Wirkprinzip für eine konstante Temperatur zu sorgen. Dies erfolgt bei der praktischen Anwendung durch Thermostate. Erfolgt die Temperaturmessung bei einer Vergleichsstellentemperatur, die von der Vergleichsstellentemperatur bei der Kalibrierung abweicht, dann ist die tatsächliche Temperatur ϑ aus der angezeigten Temperatur ϑ_A (bei linearer statischer Kennlinie) wie folgt zu errechnen:

$$\vartheta = \vartheta_A + \vartheta_V - \vartheta_K. \quad (20)$$

ϑ	tatsächliche Temperatur
ϑ_A	angezeigte Temperatur
ϑ_K	kalibrierte Vergleichsstellentemperatur
ϑ_V	vorliegende Vergleichsstellentemperatur

Sind die Anschlußklemmen der Thermoelemente für eine Thermostatisierung nicht geeignet (z. B. in der unmittelbaren Nähe von Industrieöfen oder Dampferzeugern), wird die Vergleichsstelle der Thermoelemente durch Ausgleichsleitungen an einen anderen geeigneteren Ort verlegt.

Ausgleichsleitungen haben im Bereich von 0 °C bis 200 °C die gleichen Thermospannungen wie die entsprechenden Thermopaare. Sie haben jedoch bessere elektrische und mechanische Eigenschaften.

Der Grundstromkreis für Temperaturmessungen mit Thermoelementen besteht aus dem Thermoelement und dem Anzeigeelement

Tafel 7: Grundwerte der Thermospannung für Thermopaare
(ausgewählte Werte aus TGL 39440 in mV) / 7/

$\frac{E}{\text{mV}}$ °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
- 200	-6,153	-5,603	-7,778			-5,891			
- 150	-5,111	-4,648	-6,499			-4,912			
- 100	-3,715	-3,378	-4,632		-5,237	-3,552			
- 50	-2,000	-1,819	-2,663	-3,11	-2,787	-1,889			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+ 50	2,253	2,035	2,585	3,35	3,047	2,022	0,299		0,640
+ 100	4,721	4,277	5,268	6,88	6,317	4,095	0,645		1,330
+ 150		6,452	8,008	10,62	9,787	6,137	1,029		2,075
+ 200		9,286	10,777	14,59	13,419	8,137	1,440		2,869
+ 250		12,011	13,553	18,73	17,178	10,151	1,873		3,688
+ 300		14,860	16,325	22,88	21,033	12,207	2,323	0,431	4,519
+ 350		17,516	19,089	27,14	24,961	14,292	2,786	0,596	5,362
+ 400		20,869	21,846	31,49	28,943	16,395	3,260	0,786	6,209
+ 450			24,607	35,88	32,960	18,513	3,743	1,002	7,059
+ 500			27,388	40,28	36,999	20,640	4,234	1,241	7,909
+ 550			30,210	44,71	41,045	22,772	4,732	1,505	8,754
+ 600			33,096	49,11	45,085	24,902	5,237	1,791	9,598
+ 650			36,066	53,50	49,109	27,022	5,751	2,100	10,437
+ 700			39,130	57,85	53,110	29,128	6,274	2,430	11,273
+ 750			42,283	62,17	57,083	31,214	6,805	2,782	12,104
+ 800			45,498	66,47	61,022	33,277	7,345	3,154	12,929
+ 850			48,716		64,924	35,314	7,892	3,546	13,747
+ 900			51,875		68,783	37,325	8,448	3,957	14,556
+ 950						39,310	9,012	4,386	15,352
+1000						41,269	9,585	4,833	16,136
+1100						45,108	10,754	5,777	17,660
+1200						48,828	11,947	6,783	19,146
+1300						52,398	13,155	7,845	20,576
+1400							14,368	8,952	21,963
+1500							15,576	10,094	23,303
+1600							16,771	11,257	24,590
+1700								12,426	25,820
+1800								13,585	26,999
+1900									28,118
+2000									29,117
+2100									30,186
+2200									31,136
+2300									32,025
+2400									32,856
+2500									33,636

1 Kupfer/Kopel

2 Kupfer/Kupfer-Nickel

3 Eisen/Kupfer-Nickel

4 Chromel/Kopel

5 Nickel-Chrom/Kupfer-Nickel

6 Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium

7 Platin-10 % Rhodium/Platin

8 Platin-30 % Rhodium/Platin

9 Wolfram-5 % Rhenium/Wolfram-20 % Rhenium

und entspricht dem Schaltplan im Bild 13 (Beilage).

Zur weitestgehenden gerätetechnischen Vereinheitlichung ist auch hierbei ein Abgleich vorzunehmen. Gerätetechnisch ergibt sich äußerlich ein nahezu analoger Aufbau wie beim Widerstandsthermometer. Thermoelemente bestehen aus

- dem Meßeinsatz
- dem Schutzrohr und
- dem Anschlußkopf für den geschützten Anschluß der Ausgleichs- bzw. Fernleitungen.

Zur Unterscheidung der Thermopaare, insbesondere auch zum richtigen Anschluß der einzelnen Pole, gibt es sowohl Kennfarben als auch stoffliche Unterscheidungsmerkmale. Verschiedene Meßschaltungen mit Thermoelementen zeigt Bild 14 (Beilage).

2.2.3. Halbleitermeßwiderstände

Halbleitermeßwiderstände (auch Thermistoren, Heißleiter oder NTC-Widerstände genannt) sind auf der Basis von Oxidkeramik aufgebaut und besitzen einen negativen Temperaturkoeffizienten.

Da der Temperaturkoeffizient eine Größenordnung über denen von Metallen liegt, ergibt sich eine wesentlich höhere Empfindlichkeit. Außerdem weisen die Thermistoren in der Mehrzahl größere Innenwiderstände auf, so daß ein Leitungsabgleich bei den Temperaturmessungen entfallen kann. Die statische Kennlinie der Thermistoren ist nichtlinear und entspricht näherungsweise folgender Gleichung:

$$R = a \cdot \frac{b}{e^T} \quad (21)$$

R	Widerstand des Heißleiters	$[R] = \Omega$
T	absolute Temperatur	$[T] = K$
a	Mengenkonstante	$[a] = \Omega$
b	Energiekonstante	$[b] = K$

Neben der Nichtlinearität der statischen Kennlinie ist die Temperaturabhängigkeit des Temperaturkoeffizienten von Nachteil:

$$\alpha_R = \frac{-b}{T^2}$$

(22)

Eine Auswahl statischer Kennlinien enthält Bild 15.

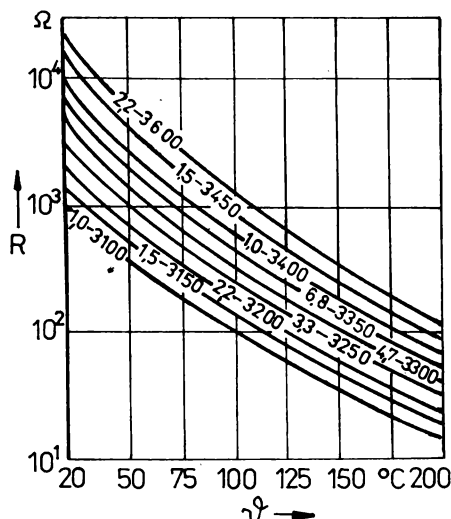


Bild 15: Statische Kennlinien von Halbleitermeßwiderständen

Neben der höheren Empfindlichkeit sind die kleinen Abmessungen von Vorteil. Die Hauptmaße ausgewählter Typen des VEB Keramische Werke Hermsdorf sind im Bild 16 wiedergegeben. Es wird unterschieden in Typ TNM für Meßzwecke, Typ TNK für Kompensationszwecke und Typ TNF-M Mikroheißeleiter als Metallfühler. Nachteilig sind neben der Nichtlinearität die mechanische Empfindlichkeit, die breite Streuung elektrischer Kennwerte und der eingegengte Einsatzbereich bis max. 200 °C. Aus diesem Grunde werden Thermistoren vorwiegend in speziellen Einsatzbereichen (Kunststoffverarbeitung, technisch-wissenschaftliche Messungen) für Temperaturmessungen eingesetzt.

A u f g a b e n

- A 6. Warum wird hauptsächlich Platin zur Temperaturmessung verwendet?
- A 7. Warum werden zur Temperaturanzeige nach dem Ausschlagverfahren hauptsächlich Kreuzspulmeßwerke eingesetzt?

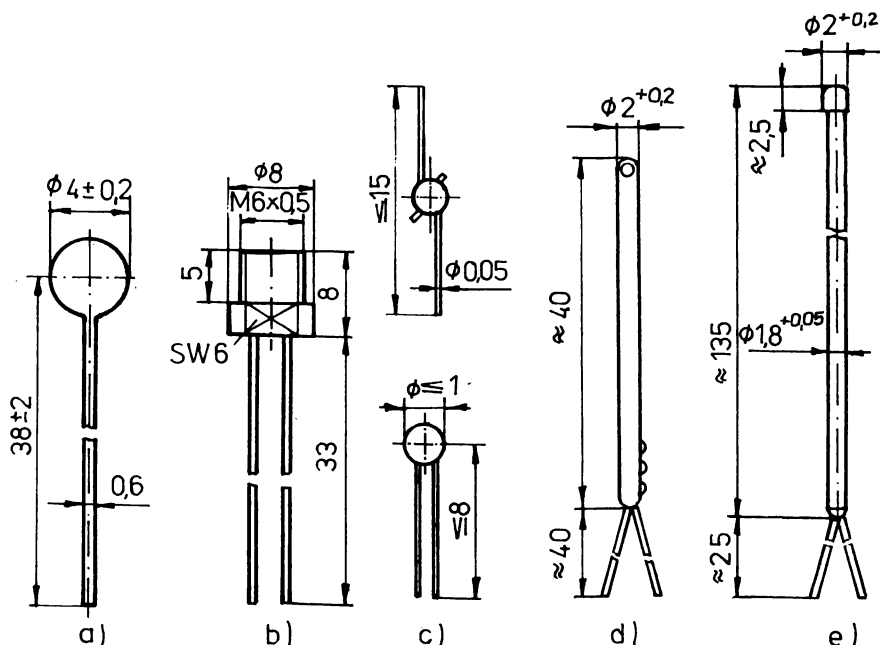


Bild 16: Hauptmaße ausgewählter Halbleitermeßwiderstände

- A 8. Welchen Vorteil hat eine Dreileiterschaltung gegenüber einer Zweileiterschaltung?
- A 9. Warum werden die Verbindungsleitungen zwischen dem Meßfühler und dem Anzeigegerät auf festgelegte Widerstandswerte abgeglichen?
- A 10. Welchen Vorteil besitzen Kompensationsschaltungen?

3. Temperaturmessung auf der Basis der Wärmestrahlung

3.1. Physikalische Grundlagen

In Abhängigkeit von der Beschaffenheit eines Körpers und der Differenz zwischen der Temperatur dieses Körpers und seiner Umgebung wird vom betreffenden Körper eine entsprechende Energie in Form elektromagnetischer Strahlung (Wärmestrahlung) auf-

genommen bzw. abgegeben.

Diese Energiestrahlung kann zur Temperaturbestimmung genutzt werden. Dabei sind die aus der Physik bekannten Eigenschaften der Körper und die Strahlungsgesetze zu beachten.

Die Strahlungsenergie, die, pro Zeiteinheit von einer Quelle abgegeben, durch ein Strahlungsfeld übertragen oder von einem Empfänger aufgenommen wird, ist eine Leistung und wird speziell als Strahlungsfluß

$$\dot{Q} = \frac{dW}{dt} \quad (23)$$

bezeichnet.

Die von einem schwarzen Körper emittierte Energie ist nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann

$$\dot{Q}_S = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (24)$$

mit der Strahlungskonstanten des Schwarzen Körpers

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}.$$

Der von einem nichtschwarzen Strahler ("grauer Strahler") abgegebene Strahlungsfluß ist bei gleicher Temperatur und Oberfläche stets kleiner als der von einem Schwarzen Körper emittierte Strahlungsfluß. Es gilt unter Berücksichtigung des Emissionsgrades

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4. \quad (25)$$

Demzufolge ist der Emissionsgrad gleich dem Verhältnis des Strahlungsflusses eines nichtschwarzen Strahlers zum Strahlungsfluß eines schwarzen Strahlers

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_S}. \quad (26)$$

Die von einem Körper ausgehende elektromagnetische Strahlung umfaßt einen großen Wellenlängenbereich (ultraviolett bis infrarot), und nur ein kleiner Teil davon ist sichtbar und für visuelle Vergleiche nutzbar (0,55 ... 0,65 μm).

Die Strahldichte L ist eine Funktion der Strahlertemperatur

und der Wellenlänge (Bild 17). Sie gibt die auf die Wellenlänge bezogene Energie der unpolarisierten Strahlung an, die von 1 cm^2 Oberfläche je Sekunde emittiert wird.

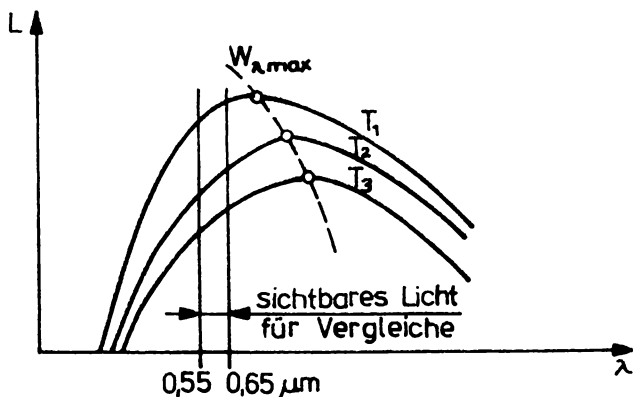


Bild 17: Strahldichte als Funktion der Wellenlänge

Von der Strahldichte ist die Helligkeit, mit der ein Körper dem Auge (oder einer Fotozelle) erscheint, abhängig. Deshalb läßt sich u. a. auch aus der Helligkeit der Strahlung im sichtbaren Bereich auf die Temperatur schließen bzw. eine Beziehung zwischen Helligkeit und Temperatur herstellen. Meßsysteme, in denen diese Zusammenhänge für Temperaturmessungen genutzt werden, heißen Pyrometer.

Pyrometer, die die gesamte einfallende Strahlungsenergie zur Temperaturmessung ausnutzen, heißen Gesamtstrahlungspyrometer; Pyrometer, die nur einen Teil des Spektrums zur Temperaturmessung ausnutzen (z. B. die Helligkeit des Lichtes einer bestimmten Wellenlänge im sichtbaren Bereich), nennt man Teilstrahlungspyrometer.

3.2. Technische Pyrometer

3.2.1. Gesamtstrahlungspyrometer

Die Gesamtstrahlungspyrometer (Bild 18) sind so aufgebaut, daß

der von der Meßstelle ausgehende und in die Optik des Gesamtstrahlungspyrometers eintretende Strahlungsfluß

$$\dot{Q} = K \int L d\lambda \quad (27)$$

gebündelt und einem Strahlungsempfänger (Fotoelement oder Thermoelement) zugeführt wird. Der Fotostrom bzw. die Thermospannung werden mit einem in °C skalierten Anzeigegerät gemessen. Der Einsatz des Gesamtstrahlungspyrometers kann nur bei annähernd schwarz strahlenden Körpern erfolgen (Messung der Temperatur in Innenräumen, z. B. Kesselfeuerungen, Röhrenöfen usw. durch eine möglichst kleine Schauöffnung).

Eine Korrektur der vom Meßinstrument angezeigten "schwarzen" Temperatur bei nicht schwarzer Strahlung ist wegen des unterschiedlichen Emissionsvermögens über den gesamten Spektralbereich nicht möglich.

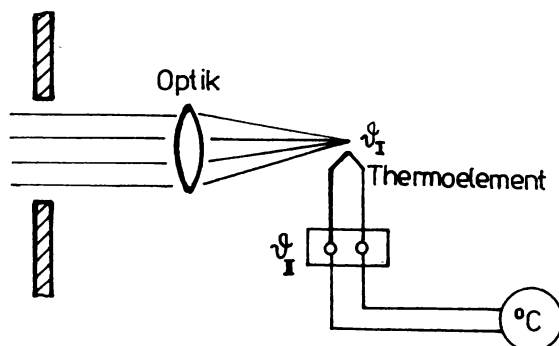


Bild 18: Prinzipieller Aufbau eines Gesamtstrahlungspyrometers
Ein vom VEB Meßgerätewerk "Erich Weinert" Magdeburg hergestelltes Gesamtstrahlungspyrometer besitzt folgende technische Daten:

Typ GSP 1871

Grundfehler, bezogen auf Meßbereichsende: $\pm 1 \%$

Temperaturbereich:

400 ... 2000 °C

Einstellzeit:

$\tau_{0,95} = 0,25 \text{ s}$

Klemmenspannung am Meßbereichsende: 15 mV

Das Fertigungssortiment wurde durch das Pyrovar-System erweitert /8/.

3.2.2. Teilstrahlungs-pyrometer

Hier wird zur Temperaturmessung nur eine bestimmte Wellenlänge (meist $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ rotes Licht) aus dem Spektralbereich herangezogen. Da zwischen Temperatur und Strahldichte L (Bild 17) einer bestimmten Wellenlänge und zwischen Strahldichte und Helligkeit ein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht, vergleicht man zur Temperaturbestimmung die Helligkeit der von der Meßstelle ausgehenden Strahlung mit der einer Vergleichslampe. Der Vergleich kann technisch auf zwei Wegen erfolgen:

1. Der durch den Glühfaden der Vergleichslampe fließende Strom wird so eingestellt, daß die Helligkeit des Fadens mit der Helligkeit der eintretenden Strahlung übereinstimmt. Der eingestellte Strom ist ein Maß für die Temperatur.
2. Die Helligkeit der Vergleichslampe bleibt konstant, die Helligkeit der von der Meßstelle eintretenden Strahlung wird durch eine Blende mit der Helligkeit der Vergleichslampe in Übereinstimmung gebracht. Die Stellung der Blende ist ein Maß für die Temperatur.

Ein Pyrometer nach dem zweiten Prinzip ist das Fotoelektrische Teilstrahlungs-pyrometer "Pyrocord" vom VEB Meßgerätewerk "Erich Weinert" Magdeburg (Bild 19). Die von der Meßstelle kommende Strahlung wird gefiltert und auf eine Fotodiode gelenkt, auf die auch die Strahlung der Vergleichslampe trifft.

Um beide auf die Fotodiode auftreffenden Strahlungen vergleichen zu können, wird eine periodische Umschaltung über einen Strahlungsunterbrecher vorgenommen. Der Belichtungsvorgang der Fotodiode erfolgt im Rhythmus der Unterbrecherfrequenz. Das Ergebnis ist ein trapezförmiger Fotostrom. Die Wechselspannungskomponente des Fotostromes gelangt über einen Verstärker zu einem Ferrarismotor, der eine Eintrittsblende solange verstellt, bis die Wechselspannungskomponente Null ist.

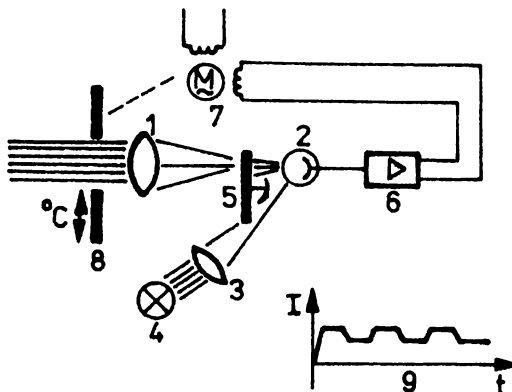


Bild 19: Prinzipieller Aufbau des Pyrocord

- | | |
|---------------------------------|-----------------------|
| 1 Objektiv | 2 Strahlungsempfänger |
| 3 Kondensator | 4 Vergleichslampe |
| 5 Unterbrecher | 6 Verstärker |
| 7 Ferrarismotor | 8 Eintrittsblende |
| 9 Verlauf des Fotodiodenstromes | |

Die Stellung der Blende ist ein Maß für die Temperatur.

Teilstrahlungspyrometer sind so wie die Gesamtstrahlungspyrometer für schwarze Strahlung geeicht. Mißt man mit ihnen Temperaturen von nicht schwarzstrahlenden Meßobjekten, so ist die angezeigte Temperatur stets kleiner als die wirkliche Temperatur T . Die wirkliche Temperatur kann nach folgender Beziehung ermittelt werden:

$$\frac{1}{T} = \lambda \frac{\ln \epsilon \lambda}{C} + \frac{1}{T_g} \quad (28)$$

T wirkliche Temperatur in K

$\epsilon \lambda$ Emissionsgrad bei der verwendeten Wellenlänge

C $1,43 \cdot 10^{-2} \text{ K}\mu\text{m}$

λ verwendete Wellenlänge (meist $0,65 \mu\text{m}$)

T_g gemessene Temperatur in K

4. Digitale Temperaturmeßeinrichtungen

Mit der Einführung der Mikroelektronik gewinnt die digitale

Temperaturmeßtechnik zunehmend an Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist das neuentwickelte Digitalthermometer DTM 2000 des VEB Thermometerwerk Geraberg mit integriertem Mikroprozessor U 880. Es gestattet in Verbindung mit Widerstandsthermometer und Thermoelementen die Maximal-, Minimal- und Mittelwertspeicherung sowie Differenztemperaturmessungen.

Lösungen der Aufgaben:

- A 1. Durch den Meßfühler wird der Meßstelle Wärme entzogen. Die zu messende Temperatur fällt wegen der geringen Wärmekapazität der Meßstelle stark ab. Das Meßergebnis ist mit einem großen Fehler behaftet.
- A 2. Die zeitliche Temperatursignaländerung ist von der Temperaturdifferenz zwischen angezeigter und wirklicher Temperatur ($\vartheta_1 - \vartheta_2$) und von einer Konstante C^* (Wärmekapazität und Wärmeübergang) abhängig.
- A 3. Der Signalverlauf nach Gl. (11)

$$T_2 - T_A = (T_1 - T_A) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

ergibt bei 5 % Abweichung den Klammersausdruck

$$\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 0,95 \rightarrow t = \tau \{-\ln(1 - 0,95)\} \rightarrow t = 3\tau$$

- A 4. Die Empfindlichkeit ist das Verhältnis der Längenänderung des Flüssigkeitsfadens zur Temperaturänderung.
- A 5. Durch eine Verengung der Kapillare, eine Vergrößerung des Ausgangsvolumens und durch Wahl einer Füllflüssigkeit mit einem großen kubischen Ausdehnungskoeffizienten.
- A 6. Platin ist mit gleichbleibendem Temperaturkoeffizienten herstellbar und läßt sich in einem großen Temperaturbereich verwenden.
- A 7. Der Ausschlag des Kreuzspulmeßwerkes hängt vom Stromverhältnis des durch beide Spulen fließenden Stromes ab. Dieses Stromverhältnis ändert sich bei Veränderung der Versorgungsspannung nur sehr wenig, so daß deren Stabilisierung entfallen kann.
- A 8. Bei der Dreileiterschaltung wirken sich Umgebungstemperaturänderungen auf beide Ströme in den Meßspulen gleich

aus, so daß eine fehlerhafte Temperaturanzeige durch Änderung der Umgebungstemperatur weitgehend vermieden wird.

- A 9. Die Vereinheitlichung der Leitungswiderstände durch Abgleich ermöglicht den Austausch von Sekundärgeräten (Anzeiger, Schreiber, Regler) trotz unterschiedlicher Entfernungen von der Meßstelle zur Meßwarte.
- A 10. Die Thermospannung wird stromlos gemessen. Widerstandsänderungen können sich nicht auf die Anzeige auswirken.

Literaturverzeichnis

- /1/ Temperaturmessung und Temperaturregelung mit Berührungsthermometern / Hoffmann, D. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1977
- /2/ TGL 31926 Flüssigkeitsglasthermometer; Maschinenthermometer
- /3/ Automation Bauteile / VEB Geräte- und Reglerwerke Teltow, Katalog
- /4/ Technisch-wissenschaftliche Glasthermometer / VEB Thermometerwerk Geraberg, Katalog
- /5/ Elektrische Thermometer / VEB Thermometerwerk Geraberg, Katalog
- /6/ TGL 39438 Metrologie; Arbeitswiderstandsthermometer
Ersatz für TGL O-43760
- /7/ TGL 39440 Metrologie; Arbeitsthermoelemente
Ersatz für TGL O-43710
- /8/ Pyrovar-System / VEB Meßgerätewerk "Erich Weinert" Magdeburg, Druckschrift

AUSSCHLAGVERFAHREN				
Grundstrom- kreis				
mit Thermostat				
mit Kompensationsdose				
mit Nullpunktunterdrückung				
mit Verstärker				
KOMPENSATIONSVERFAHREN				
Strommessverfahren				
Potentiometer – verfahren				
automatisches Potentiometer				

Bild 14: Meßschaltungen mit Thermoelementen

G Galvanometer, E_x Thermospannung, E_v Vergleichs-
spannung, R_A Abgleichwiderstand, R_v Vorwiderstand,
 R_K Kompensationswiderstand, U_x Spannungsabfall

AUSSCHLAGVERFAHREN		
Zweileiterschaltung	Schaltung mit Kreuzspul-instrument	Dreileiterschaltung mit Kreuzspul-instrument
KOMPENSATIONSVERFAHREN		
Spannungskompensations-verfahren	automatisches Brückenhaltverfahren	

Bild 9: Meßschaltungen für Widerstandsthermometer

G Galvanometer R_1 bis R_4 Brückenwiderstände
E Gleichspannungsquelle R_V Vorwiderstand
 R_A Abgleichwiderstand N Netzgerät
 R_{θ} Widerstandsthermometer Q Quotientenmesser

WIDERSTANDSTHERMOMETER

MESSEINSATZ

SCHALTPLAN

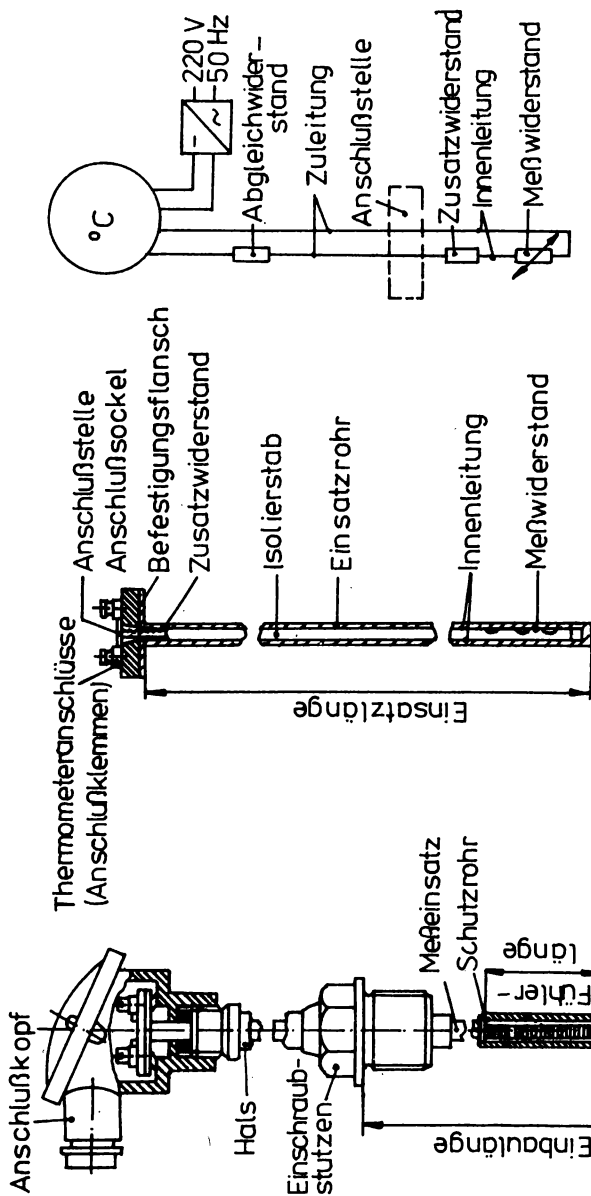
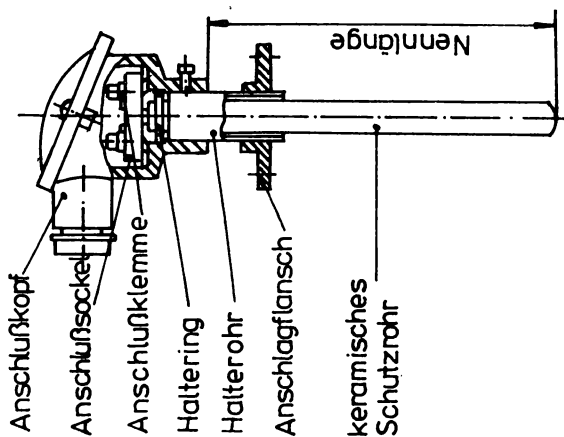
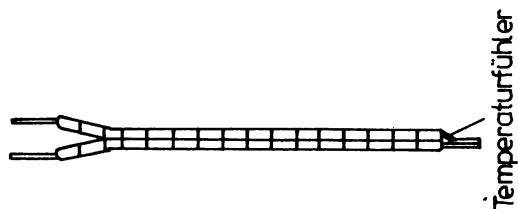


Bild 10: Aufbau von Widerstandsthermometern, deren Meßeinsatz und zugehöriger Schaltplan

THERMOELEMENT



THERMOPAAR MIT ISOLIERROHREN



SCHALTPLAN

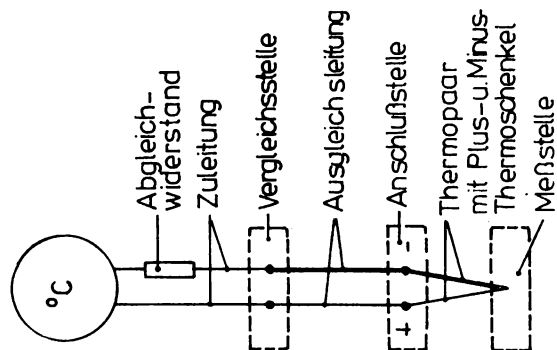


Bild 13: Aufbau von Thermoelementen, deren Thermopaar und zugehöriger Schaltplan

FSD Ing. Wolfgang Hofmann

M E S S -- S Y S T E M E

0.20

Systeme zur Messung
mechanischer Größen

Verfasser:

FSD Ing. Wolfgang Hofmann
Ingenieurschule für Walzwerk- und Hüttentechnik Riesa

Lektoren:

FSD Dipl.-Ing. Kurt Bahn
Ingenieurhochschule Köthen

Dr. Herbert Kathe
Ingenieurhochschule Köthen

Bearbeiter:

Prof. Dr. sc. techn. Werner Richter
Technische Hochschule Leipzig

FSD Dipl.-Ing. Günter Helm
Institut für Fachschulwesen Karl-Marx-Stadt

Redaktionsschluß: 8. 3. 1977

Überarbeitung: März 1978

Als Manuskript gedruckt • Alle Rechte vorbehalten
Veröffentlicht:

INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
Karl-Marx-Stadt

Druck und buchbinderische Verarbeitung:

ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU

Ag 613/544/85/1000

2. Ausgabe

8. Auflage

Vorzugsschutzgebühr: 2,50 M

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Kurzzeichen	
1. Einleitung	1
2. Stückzahl und Drehzahl	1
2.1. Zähler	1
2.2. Drehzahlmesser	2
3. Weg und Winkel	8
3.1. Wegmeßverfahren	8
3.2. Winkelmeßverfahren	11
4. Geometrische Abmessungen	14
4.1. Dickenmeßverfahren	14
4.2. Breitenmeßverfahren	18
4.3. Längenmeßverfahren	20
5. Behälterstand	23
5.1. Standmessung mittels Schwimmer	23
5.2. Hydrostatische Füllstandsmessung	24
5.3. Elektrische Standmessung	26
5.4. Füllstandsmessung mit Radionukliden	27
6. Kraft und Drehmoment	29
6.1. Kraftmeßverfahren	29
6.2. Drehmomentenmeßverfahren	35
7. Druck	38
7.1. Flüssigkeitsmanometer	38
7.2. Federmanometer	43
8. Menge und Durchfluß	45
8.1. Wägeverfahren	45
8.2. Volumenmeßverfahren	50
8.3. Durchflußmeßverfahren	53
Lösungen der Aufgaben und Übungen	59
Literaturverzeichnis	63
Sachwortverzeichnis	65

Verzeichnis der Kurzzeichen

A	Querschnitt	t	Zeitdauer
B	magnetische Induktion	U	elektrische Spannung
b	Barometerstand	U _k	Klemmenspannung
C	elektrische Kapazität	U _l	Leerlaufspannung
D	Durchmesser	U _o	Speisespannung
d	Dicke, Plattenabstand	U _l	Teilerspannung
E	Elastizitätsmodul, Ursprung, Empfindlichkeit	V	Volumen
F	Kraft, Meßfehler, Fliehkraft	V _o	reduziertes Volumen
F _S	Schwerkraft	v	Geschwindigkeit
F _Z	Zugkraft	W _p	polares Widerstandsmoment
f	Frequenz	x	unbekannte Größe
G	Gleitmodul	z	Anzahl
g	Erdbeschleunigung	α	Drehwinkel, Längenausdehnungskoeffizient
h	Höhe, Steigung	Δ	Änderung (Δl , ΔL , Δp , ΔR)
I	Stromstärke	ϵ	Dielektrizitätskonstante
I _m	mittlere Stromstärke	ϵ	Dehnung
i	Augenblickswert des Stromes	ϵ_{45}	Dehnung im Winkel von 45°
K	Konstante	Θ	absolute Temperatur
K _v	Volumenkonstante	Θ_o	absolute Normaltemperatur
K _m	Massenkonstante	ϑ	Temperatur (in Grad Celsius)
k	k-Faktor	κ	elektrische Leitfähigkeit
L	Induktivität	ρ	spez. Widerstand, Dichte
l	Länge	σ	mechanische Spannung
M _d	Drehmoment	φ	Drehwinkel
M _a	äußeres Moment	ω	Winkelgeschwindigkeit
M _i	inneres Moment		
m	Masse		
m _A	Flächenmasse		
n	Drehzahl, Umlauffrequenz		
p	Überdruck, hydrostatischer Druck		
p _o	Normaldruck		
p _{dyn}	dynamischer Druck		
p _{ges}	Gesamtdruck		
p _{stat}	statischer Druck		
p ₁ –p ₂	Wirkdruck, Differenzdruck		
Q	Durchfluß		
Q _v	Volumendurchfluß		
Q _m	Massedurchfluß		
R	elektrischer Widerstand		
R _i	innerer Widerstand		
R _g	Gerätewiderstand		
R _L	Leitungswiderstand		
R _v	Vorwiderstand		
r	Radius		
T	Schwingungsdauer		

1. Einleitung

Die Möglichkeiten zur Messung mechanischer Größen sind sehr zahlreich. Der Lehrmaterial-Baustein soll Anregungen zur Lösung von Meßaufgaben vermitteln und beschreibt vorwiegend typische Meßverfahren, die sich in der BMSR-Technik bewährt haben. Mit der angegebenen Literatur ist ein vertiefendes Studium möglich.

Der vorliegende Lehrmaterial-Baustein steht im Zusammenhang mit dem Baustein „Grundlagen für Systeme zur Informationsgewinnung“ /15/. Dort werden die Begriffe Signal, Meßwertwandlung, Empfindlichkeit, Fehlerklasse, Fehlergrenze, Einstellzeit u. a. behandelt, die hier als bekannt vorausgesetzt werden. (TGL 22500)

Die Informationsgewinnung und -übertragung erfolgt in der Praxis häufig mit elektrischen Signalträgern. Es wird deshalb empfohlen, parallel zum vorliegenden Lehrmaterial den Lehrmaterial-Baustein „Systeme zur Messung elektrischer Größen“ /16/ durchzuarbeiten.

2. Stückzahl und Drehzahl /1/, /2/, /3/, /5/

2.1. Zähler

Die Anzahl von erzeugten, bearbeiteten oder transportierten Gegenständen läßt sich mit Zählern ermitteln. Die Grundform eines **mechanischen Zählers** bildet eine Klinke und ein Zählrad (Bild 2.1). Bei jeder Hubbewegung der Klinke wird das Zählrad um eine Ziffer weitergedreht. Durch Kopplung mehrerer Räder mit Zehnerübertragung (Zehnerräder) läßt sich die Stellenzahl beliebig erweitern.

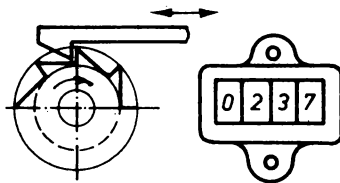


Bild 2.1: Mechanisches Zählwerk

Das Zählwerk kann von Hand auf Null zurückgestellt werden. Manche Zähler besitzen eine Vorwahlmöglichkeit. Erreicht das Zählwerk die eingestellte Zahl, wird ein elektrischer Kontakt geschlossen.

Für örtlich anzeigende Zähler ist die direkte mechanische Kopplung mit einer Drehbewegung (Welle) oder einer Hubbewegung (Hebel) typisch. Ist das Zählsignal über größere Entfernungen zu übertragen, werden Geber und Anzeige getrennt. Beim **elektromechanischen Zähler** ist ein **elektromagnetisches Triebssystem** vorhanden. Das erforderliche elektrische Signal (Stromstoß) wird durch die Betätigung eines Schaltkontaktes (Zählung mit Berührung) oder mit Hilfe fotoelektrischer bzw. induktiver Meßwandler (Zählung ohne Berührung) gewonnen.

Der pneumatische Zähler besteht aus Zehnerrädern, die von einem pneumatischen Triebssystem (Membran, Kolben) angetrieben werden. Das pneumatische Signal (Druckstoß) wird meistens durch mechanische Betätigung eines Düse-Prallplatte-Systems erzeugt.

Für hohe Zählfrequenzen müssen elektronische Zähler eingesetzt werden. Dabei sind Zählfrequenzen bis 10^6 Hz möglich. (Näheres siehe /16/).

A 1. Auf welche Weise erfolgt die Signalübertragung vom Meßort zu den beschriebenen Zählerarten?

A 2. Warum ist die mit mechanischen Zählern erfaßbare Zählfrequenz relativ niedrig?

2.2. Drehzahlmesser

Als Drehzahl n wird die Anzahl der Umdrehungen U eines rotierenden Körpers in der Zeiteinheit bezeichnet. Während man in der Physik die Frequenz mit der Einheit $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ verwendet, ist in der Technik für die Umlauffrequenz die Angabe in U/min oder U/h üblich. Mit Hilfe mechanischer Getriebe, wie Seiltrieb, Zahnstange oder Reibrad, läßt sich jede geradlinige Bewegung (Translation) in eine Drehbewegung (Rotation) umformen. Demzufolge kann die Winkelgeschwindigkeit ω als Abbildungsgröße für die geradlinige Geschwindigkeit v verwendet werden. Die Beziehung zwischen Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl ist dann

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \frac{n}{U/s} \bigg| \frac{\omega}{\text{rad/s}} \qquad (2.1)$$

Der mechanische Drehzahlmesser wird vorwiegend in tragbarer Form hergestellt (Handtachometer) und ist für stichprobenartige Messungen geeignet. Als Wandlungsglied dient ein Kreuzpendel (Bild 2.2).

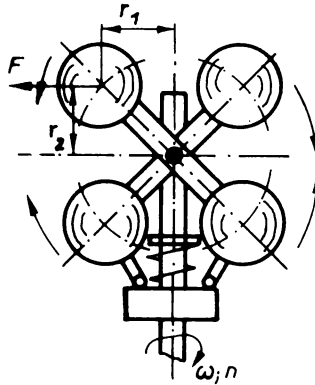


Bild 2.2: Meßwerk des Handtachometers mit Kreuzpendel

Ist r_1 der waagerechte Abstand des Massenschwerpunktes einer Kugel zur Drehachse, dann entsteht bei Rotation durch die Fliehkraft $F = m \cdot r_1 \cdot \omega^2$ ein inneres Moment $M_i = F r_2 = m r_1 \omega^2 r_2$, das als Belastung auf eine Feder wirkt. Die Ausgleichsbewegung wird durch ein Gestänge auf einen genuteten Ring übertragen und als Zeigerbewegung ausgewiesen.

Die Anzeige ist nicht linear, aber unabhängig von der Drehrichtung der Antriebswelle. In Verbindung mit einem zwischengekoppelten Schaltgetriebe lassen sich Meßbereiche von 40 . . . 160 U/min bis 12000 . . . 48000 U/min einstellen. Die auf den Meßbereichsendwert bezogene Fehlergrenze beträgt etwa 1,5 %.

Als Meßwertgeber für Zweipunktreger kann der Fliehkraft-Drehzahlmesser mit elektrischen Kontakten für einen oberen und einen unteren Grenzwert versehen werden (Drehzahlwächter). Diese Ausführung ist besonders einfach und robust.

Der Wirbelstrom-Drehzahlmesser gehört dem physikalischen Prinzip nach zu den elektrischen Drehzahlmessern. Ein Permanentmagnet mit ausgeprägten Polen rotiert mit der zu ermittelnden Drehzahl (Bild 2.3) und wird von einem elektrischen Leiter in Form einer Aluminiumtrommel umschlossen. Durch die Relativbewegung zwischen Magnetfeld und Leiter entstehen in der Trommel Wirbelströme, die ihrerseits mit dem Magnetfeld in Wechselwirkung treten und ein Drehmoment auf die Trommel ausüben. Die Trommel wird in Drehrichtung soweit mitgenommen, bis die Rückstellfeder ein gleichgroßes Gegenmoment erzeugt.

Die Anzeige ist linear und drehrichtungsabhängig. Die zugeordnete Fehlerklasse beträgt etwa 1. Die Ausführung ist sehr robust und erlaubt den Einsatz als Fahrzeugtachometer.

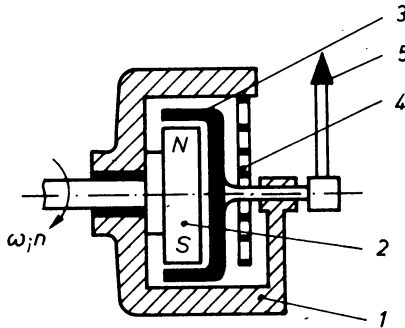


Bild 2.3: Wirbelstrom-Drehzahlmesser

1 Gehäuse, 2 Permanentmagnet, 3 Aluminiumtrommel, 4 Spiralfeder, 5 Zeiger

Der Tachogenerator ist ein kleiner Gleichspannungs- oder Wechselspannungsgenerator, dessen induzierte Spannung proportional zur Drehzahl ist. Um eine Klemmenspannung zu erhalten, die in weiten Bereichen linear ist, wird der Generator nur wenig belastet, d. h. im Leerlaufbereich betrieben. Die Erregung erfolgt bei kleineren Ausführungen durch Dauermagnete.

Der Gleichstromtachogenerator liefert eine durch Kommutator gleichgerichtete und drehrichtungsabhängige Spannung, die mit einem Drehspulgerät gemessen werden kann (Bild 2.4).

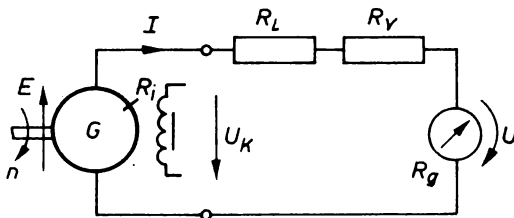


Bild 2.4: Meßschaltung für Gleichstromtachometer

Mit $E = K \cdot n$

ergibt sich die Drehzahl aus

$$n = \frac{U}{K} \left(1 + \frac{R_i + R_L + R_V}{R_g} \right) \quad (2.2)$$

A 3. Leiten Sie die Gleichung (2.2) ab!

Bei Bedarf kann die Anzeige durch eine Verstellung des Vorwiderstandes R_v beeinflusst werden (siehe Gleichung 2.2)).

Beispiel:

Ein Tachogenerator liefert bei $n = 2000 \text{ U/min}$ eine Klemmenspannung von 100 V . Das Drehzahlanzeigergerät ist für 45 V ausgelegt. Wie groß ist der Vorwiderstand zu wählen, wenn $R_i = 5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$, $R_g = 500 \Omega$ betragen und der Meßbereich für $0 \dots 1000 \text{ U/min}$ ausgelegt werden soll?

Lösung:

Zunächst die Klemmenspannung im unbelasteten Zustand aus der Beziehung

$$\frac{U_{\max}}{U_{\text{Bereich}}} = \frac{n_{\max}}{n_{\text{Bereich}}}$$

$$U_{\text{Bereich}} = \frac{100 \text{ V}}{2000 \text{ U/min}} \cdot 1000 \text{ U/min}$$

$$U_{\text{Bereich - Soll}} = 50 \text{ V.}$$

Gleichung (2.2) nach R_v umgestellt ergibt mit

$$n \cdot K = U_{\text{Bereich-Soll}}$$

$$R_v = \left(\frac{U_{\text{Bereich-Soll}}}{U_{\text{Bereich-Ist}}} - 1 \right) R_g - (R_i + R_L)$$

$$R_v = \left(\frac{50 \text{ V}}{45 \text{ V}} - 1 \right) 500 \Omega - (5 + 10) \Omega$$

$$R_v = \underline{\underline{40,5 \Omega}}$$

Nachteilig ist beim Gleichstromtachogenerator, daß sich die Änderungen der Übergangswiderstände am Kommutator sowie Widerstandsänderungen infolge der Veränderung der Umgebungstemperatur als Meßfehler bemerkbar machen. Für Präzisionsmessungen empfiehlt sich eine Spannungsmessung nach dem Kompensationsprinzip (Vergleiche mit /15, Abschn. 3.3.2./). Nach TGL 200—4653 Bl. 1 sind die Nennspannungen zu 20 V, 50 V und 100 V festgelegt. Der reduzierte Grundfehler beträgt je nach Ausführung 0,1 bis 2,5 %.

Der Wechselspannungstachogenerator benötigt keine Schleifübertragung, wenn der Rotor als Polrad ausgeführt wird. Zur Anzeige mittels Drehspulgerät ist die Klemmenspannung gleichzurichten. Wird nicht die Spannung, sondern die Frequenz als Informationsparameter genutzt (die Frequenz wird durch die Umgebungstemperatur nicht beeinflusst), ist die Signalübertragung über große Entfernungen möglich.

Durch geeignete Zusammenschaltung mehrerer Generatoren kann man Drehzahldifferenzen, Drehzahlverhältnisse bzw. den Drehzahlrutsch messen.

Für stetige Regler mit pneumatischer Hilfsenergie eignen sich pneumatische Drehzahlgeber als Meßfühler. Derartige pneumatische Drehzahlgeber sind das Meißgebläse, das nach dem Prinzip eines Radialgebläses arbeitet (quadratische Kennlinie, Drehzahlbereich 0 ... 2000 U/min, Unterdruck am Saugstutzen bis 1000 Pa) oder die ventillose Membranpumpe (Drehzahlbereich 0 ... 1500 U/min, Überdruck ca. 2000 Pa).

Für genaue und gegebenenfalls berührungslöse Drehzahlmessungen werden elektronische Drehzahlmesser eingesetzt. Mit Hilfe geeigneter Einrichtungen wie Lochscheiben, Nockenscheiben, elektromagnetischer Geber oder fotoelektrischer Wandler (Bild 2.5) werden diskrete Signale gewonnen, die entweder analog oder diskret weiterverarbeitet werden.

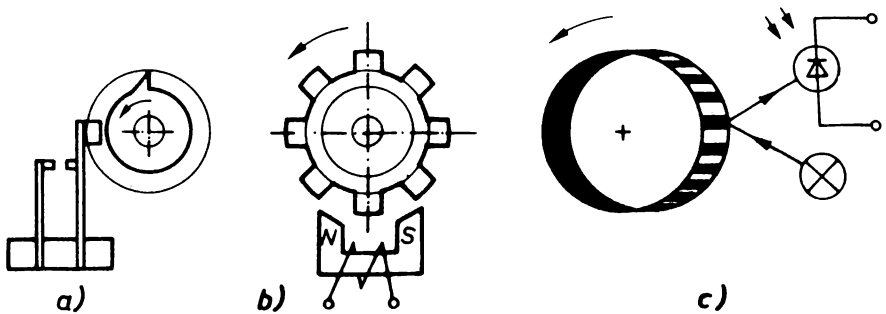


Bild 2.5: Arten von Impulsgebern

a) elektromechanisch, b) induktiv, c) fotoelektrisch

Zur analogen Anzeige werden die Impulse durch einen Impulsformerbaustein in Rechteckimpulse konstanter Höhe und Breite umgeformt. Speist man damit ein Drehspulgerät, wird der Mittelwert

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt \quad (2.3)$$

angezeigt. Der Zeigerausschlag ist der Drehzahl direkt proportional. Die Mindestdrehzahl eines einfachen Impulsgebers sollte etwa 100 U/min (ca. 1,7 U/s) betragen, damit eine ruhige Anzeige erreicht wird.

Eine digitale Anzeige liefern elektronische Zähler, die von einem Zeitnormal gesteuert werden (siehe /16/). Beträgt das Meßzeitintervall 1 s und besitzt die Meßwelle eine Loch- bzw. Zahnscheibe mit einer 60er Teilung (60 Impulse für einen Umlauf), dann ergibt die Anzeige die Drehzahl in U/min. Der Meßfehler kann unter Beachtung der Beziehung

$$F = \frac{1}{T \cdot z \cdot n} \quad (2.4)$$

worin

T die Periodendauer des Zählvorganges (Meßzeitintervall),

z Anzahl der Impulse pro Umlauf,

n Drehzahl sind,

sehr klein gehalten werden, da sich durch Anbringen von Zahn- und Lochscheiben mit feiner Teilung eine hohe Zählfrequenz erreichen läßt.

Beispiel:

Eine Welle hat eine Drehzahl von 6000 U/min. Die Periodendauer des Zählvorganges beträgt 0,1 s. Wie groß ist der Meßfehler, wenn eine Zahnscheibe mit einer 100er Teilung Verwendung findet?

Lösung:

Mit Gleichung (2.4) ist

$$F = \frac{1}{0,1 \text{ s} \cdot 100 \cdot 100 \text{ s}^{-1}} = 0,001 = \underline{\underline{0,1 \%}}$$

Zusammenfassung

Stückzahlen werden mit Hilfe mechanischer, elektromechanischer, pneumatischer oder elektronischer Zähler erfaßt. Drehzahlen lassen sich analog mit Hilfe von Handtachometern, Wirbelstromtachometern oder Tachogeneratoren messen. Die genauere digitale Messung erfolgt mit elektronischen Zählern.

Übungen

- 2.1. Die mit Hilfe eines Transportbandes beförderten Stückgüter sollen gezählt werden. Nennen Sie Möglichkeiten zur Signalgewinnung!
- 2.2. Beschreiben Sie den prinzipiellen Aufbau eines elektromechanischen Zählers und nennen Sie Varianten zur Erzeugung des Meßsignals!
- 2.3. Welche Drehzahlmesser arbeiten unabhängig von der Drehrichtung?
- 2.4. Von welchen Einflußgrößen hängt der Meßfehler einer digitalen Drehzahlmeßeinrichtung ab?
- 2.5. Bei dem Tachogenerator nach dem auf Seite 5 erläuterten Beispiel erhöhe sich $R_t + R_L$ durch Temperatureinwirkung auf 20 Ω . Wie groß ist der absolute Meßfehler für die Drehzahl $n = 1000 \text{ U/min}$?

3. Weg und Winkel /1/, /3/, /5/, /17/

Zur Messung großer Wege und Winkel existiert eine Vielzahl von Meßverfahren. Dieser Abschnitt enthält eine Auswahl. Präzisionsmeßverfahren für Wege und Winkel, die in der Fertigungsmeßtechnik Verwendung finden, werden nicht beschrieben. Eine Übersicht dazu vermittelt /14/.

3.1. Wegmeßverfahren

Die Bewegungen eines Laufkranes, die Stellung eines Pressenstempels oder eines Arbeitskolbens lassen sich als analoge elektrische Größe abbilden, wenn man einen kalibrierten Draht parallel zur Bewegungsrichtung anordnet und einen beweglichen Schleifer oder eine Rolle mit der Bewegungsgröße koppelt. Die Meßschaltung ist im einfachsten Fall ein Spannungsteiler (Bild 3.1).

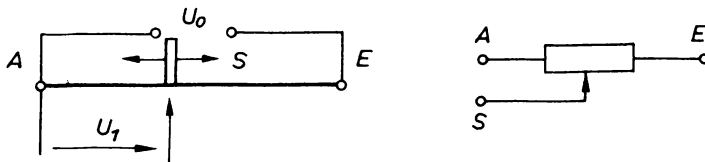


Bild 3.1: Schleifdraht als Spannungsteiler

A Anfang, S Schleifer, E Ende, U_0 Speisespannung, U_1 Teilerspannung

Für den Leerlauf gilt nach der Spannungsteilerregel

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_{AS}}{R_{AE}}$$

Mit der Beziehung für den Ohmschen Widerstand

$$R_{AE} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \text{und} \quad R_{AS} = \rho \cdot \frac{l_x}{A} \quad \text{ergibt sich}$$

$$U_1 = U_0 \cdot \frac{l_x}{l} \quad (3.1)$$

Beispiel:

Um den Nullpunkt der Anzeige unabhängig von der Schleiferstellung einstellen zu können, soll als Meßschaltung die Wheatstonesche Brücke verwendet werden. Welche Beziehung gilt für den Gleichgewichtszustand nach Bild 3.2?

Lösung:

Für den Gleichgewichtsfall müssen die Produkte der gegenüberliegenden Widerstände gleich sein.

$$(R_1 + R_{AS1}) \cdot (R_4 + R_{SE4}) = (R_2 + R_{SE2}) \cdot (R_3 + R_{AS3})$$

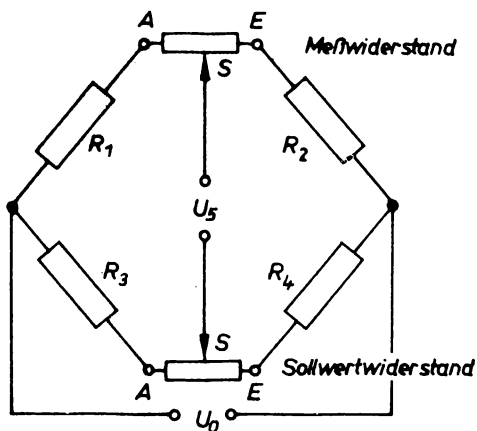


Bild 3.2: Wheatstonesche Brücke mit 2 Stellwiderständen

Zur kontaktlosen Messung kleinerer Wege dient der in der Größenordnung von einigen Millimetern verwendete **Differentialtransformator** (Bild 3.3).

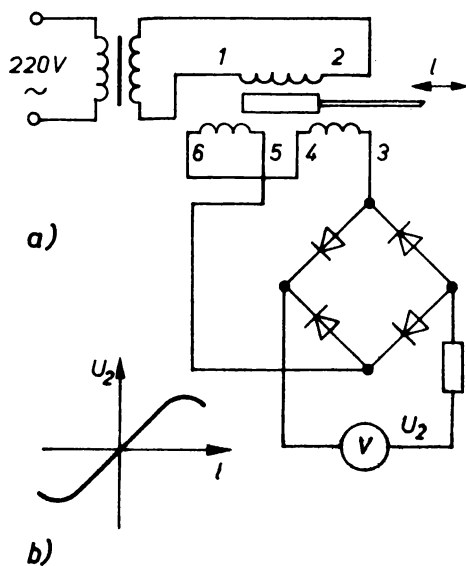


Bild 3.3: Differentialtransformator
 a) Meßschaltung, b) Kennlinie

Dieser Meßfühler besitzt drei Wicklungen auf einem unmagnetischen Hohlzylinder. Die Primärwicklung wird mit Wechselstrom gespeist. Der bewegliche Eisenkern beeinflusst die Kopplung mit den beiden Sekundärwicklungen, die gegeneinander geschaltet sind. In der Mittelstellung des Kerns sind die in beiden Spulen induzierten Spannungen gleich groß und heben sich auf. Wird der Kern aus der Mittellage heraus bewegt, ergibt sich eine Differenzspannung, die in Grenzen proportional zur Verschiebung ist. Die Differenzspannung kann nach Gleichrichtung mit Hilfe eines Drehspulgerätes angezeigt werden.

Zur Messung geradliniger Bewegungen mit hoher Genauigkeit, z. B. für Positionierungsaufgaben an Werkzeugmaschinen, geht man zu digitalen Meßverfahren über. Auf einem polierten Strichmaßstab ist entweder ein Strichraster oder ein Koderaster eingätzt (Bild 3.4). Die Abtastung erfolgt durch fotoelektrische Bauelemente.

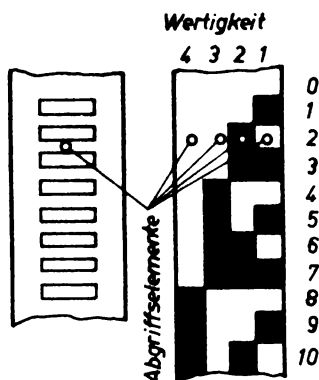


Bild 3.4: Kodelineal

a) Strichraster, b) Koderaster

Während mit dem Koderaster eine absolute Messung (fester Bezugspunkt) möglich ist, wird mit dem Strichraster in Verbindung mit einem Zähler nur die Zunahme oder Abnahme erfasst. Der Bezugspunkt läßt sich beliebig festlegen.

Beispiel:

Mit einem Kodelineal soll ein Weg von 640 mm erfasst werden. Der Teilungsschritt beträgt 2,5 mm. Wieviel Spuren (Kanäle) sind beim Dualcode erforderlich?

Lösung:

$$\text{Anzahl der Schritte} = \frac{\text{Meßbereich}}{\text{Teilungsschritt}} = \frac{640 \text{ mm}}{2,5 \text{ mm}}$$

$$x = 256$$

Anzahl der Spuren z aus $x = 2^z$

$$z = \frac{\lg 256}{\lg 2} = \frac{2,4082}{0,3010} = 8$$

A 4. Was geschieht bei dem Übergang auf dem Koderaster nach Bild 3.4 von Ziffer 3 auf Ziffer 4, wenn Herstellungsgenauigkeiten vorhanden sind?

A 5. Welches von den aufgeführten Meßverfahren ist aus Verschleißgründen nicht für Dauer-
messungen geeignet?

3.2. Winkelmessverfahren

Zur Erfassung des Drehwinkels einer Kurbel, der Stellung einer Schraubenspindel oder der Stellung einer Drosselklappe ist die Umformung des Winkels in eine proportionale Widerstandsänderung ein häufig verwendetes Prinzip. Der Meßumformer, ein **Potentiometer**, besteht aus einem Drahtwiderstand, der auf einen kreisförmigen Isolierkörper gewickelt ist (Bild 3.5). Der Abgriff erfolgt mittels Schleifer.

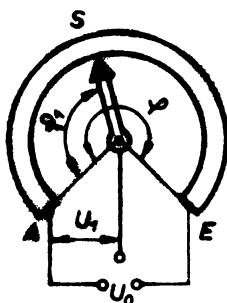


Bild 3.5.: Meßpotentiometer

Meßschaltung ist entweder die Spannungsteilerschaltung oder die Brückenschaltung. Im ersten Fall gilt

$$U_1 = U_o \cdot \frac{\varphi_1}{\varphi} \quad (3.2)$$

Einfache Meßeinrichtungen benutzen ein Kreuzspulmeßgerät zur Anzeige. Die hierzu erforderliche Meßschaltung soll nicht näher erläutert werden (Vergleiche /16; Abschnitt 3.3.3./).

Die Meßpotentiometer werden üblicherweise in den Größen von 100 . . . 10000 Ω mit einem Drehwinkel von 270° hergestellt. Präzisionsmeßpotentiometer erreichen eine Fehlerklasse ≥ 1. Die kleinste meßbare Widerstandsänderung wird bei den Drahtpotentiometern durch die Stufigkeit der Wicklung bestimmt. Wicklungen mit sehr dünnen Drähten ermöglichen die Messung von Winkeländerungen in der Größenordnung von 0,1°. Benutzt man das Potentiometer als Zusatzgerät zum Abgriff der Zeigerbewegung von Meßgeräten, heißt es oft Widerstandsferngeber.

A 6. Welche Maßnahmen sind erforderlich, wenn ein Winkel von 540° gemessen werden soll, aber nur ein Meßpotentiometer mit 270° zur Verfügung steht?

In modernen Betriebsmeßanlagen strebt man eine digitale Signalübertragung und -verarbeitung an. Zum Abgriff des Signals von analogen Zeigergeräten wird an Stelle eines Widerstandsferngebers eine Umsetzerscheibe (Bild 3.6) verwendet.

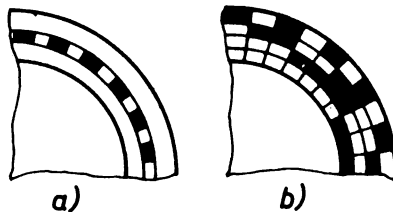


Bild 3.6 : Umsetzerscheibe
a) Strichraster, b) Koderaster

Der Aufbau entspricht dem eines Kodelineals. Die Auflösung beträgt 100 . . . 1000 Schritte/Umdrehung. Der Abtastvorgang erfolgt über Schleifkontakte oder fotoelektrisch.

A 7. Welche Abgriffmöglichkeiten können an einer Umsetzerscheibe zur Anwendung kommen?

Für Meßaufgaben, die robuste Geräte verlangen, werden **Drehmelder** eingesetzt. Der Aufbau ähnelt dem eines Wechselstromgenerators (Bild 3.7). Im Ständer befindet sich eine dreisträngige Wicklung und im Rotor eine Einphasenwicklung. Für Anzeigerzwecke in einem begrenzten Winkelbereich ($< 2\pi$ rad) genügt die Anordnung im Bild 3.7. Wird der Ständer in der gezeichneten Weise mit Einphasenwechselstrom erregt, setzen sich die magnetischen Felder zwischen 3 und 5 sowie 3 und 4 zu einem (im Bild senkrechten) Wechselfeld zusammen.

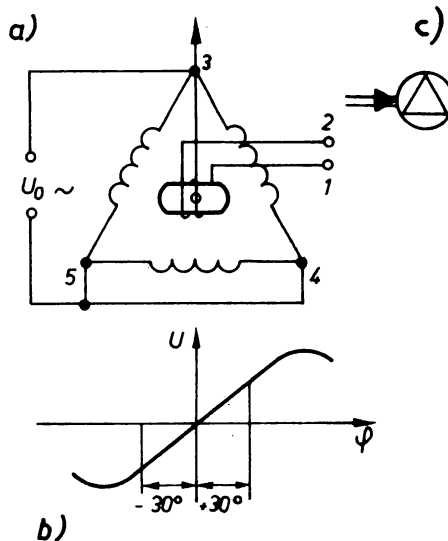


Bild 3.7.: Drehmelder

a) Meßschaltung, b) Kennlinie, c) Symbol

In der gezeichneten Läuferstellung ist die dort induzierte Spannung Null. Bei einer Drehung des Läufers nach rechts oder nach links entsteht eine Wechselspannung mit entsprechender Amplitude und Phasenlage. Beschränkt man den Ausschlag auf $\pm 30^\circ$, kann der Spannungsverlauf als

linear angenommen werden. Der Läufer besitzt keine Schleifringe, die Spannung wird über richtkraftlose Bänder abgenommen, so daß Störmöglichkeiten durch schlechte Kontaktgabe wegfallen. Zur Anzeige ist ein Drehpulvergerät in Verbindung mit einem Gleichrichter geeignet.

Zusammenfassung

Zur Messung großer Wege eignen sich der analoge Schleifdrahtgeber oder der digitale Strichmaßstab. Winkel werden analog mit Hilfe von Potentiometern und Drehmeldern oder digital durch Umsetzerscheiben erfasst.

Übungen

- 3.1. Mit welchen Hilfsmitteln kann man eine geradlinige Bewegung in eine Drehbewegung umformen und mit einem Winkelgeber erfassen?
- 3.2. Welcher Meßbereich läßt sich mit zwei Umsetzerscheiben, die mittels Getriebe mit 100:1 gekoppelt sind, erreichen, wenn jede Scheibe für zwei Dezimalstellen ausgelegt ist?
- 3.3. Welche kleinste Winkleinheit kann durch eine Umsetzerscheibe mit einer 512er Teilung auf 270° erfasst werden?

4. Geometrische Abmessungen /5/, /10/, /17/

In vielen Industriezweigen (Metallurgie, Kunststoff- und Gummiindustrie u.a.) muß das Halb- bzw. Fertigerzeugnis bestimmten Forderungen hinsichtlich der geometrischen Abmessungen (Dicke, Breite und Länge) entsprechen. Stichprobenartige Kontrollen werden zunehmend durch die kontinuierliche Betriebskontrolle ersetzt, wofür in jüngerer Zeit eine Anzahl von Geräten und Verfahren entwickelt worden sind.

4.1. Dickenmeßverfahren

Die mechanischen Dickenmeßgeräte arbeiten nach dem Prinzip der Berührung. Ein Gleitschuh oder eine Rolle tastet ständig die Banddicke ab (Bild 4.1).

Dickenänderungen rufen eine Vertikalbewegung hervor, die sich mit Hilfe geeigneter Meßwandler in eine elektrische Größe umformen läßt. Die Ausgangsgröße entspricht allerdings nicht dem absoluten Dickenwert, sondern nur der Abweichung von einem vorgegebenen Sollwert.

Der Meßgegenstand (Band) ist vor der Meßstelle von Öl und Schmutz zu befreien. Für eine gute Führung ist zu sorgen. Um Flattererscheinungen zu vermeiden, sollen Geschwindigkeiten von 5 m/s nicht überschritten werden

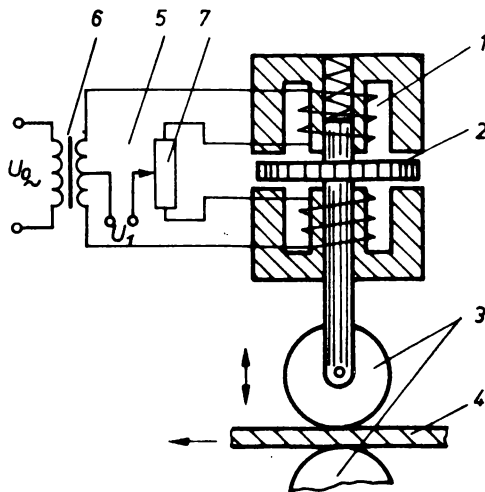


Bild 4.1: Dickenmesser mit mechanischem Taster

1 Meßspulen, 2 Anker, 3 Meßrollen, 4 Meßgegenstand (Band),
5 Brückenschaltung, 6 Transformator, 7 Nulleinstellung

A 8. Nennen Sie Werkstoffe, deren Dicke mit Hilfe mechanischer Dickenmeßgeräte nicht erfaßt werden kann!

Für Meßaufgaben an ferromagnetischen Werkstoffen wird das **magnetische Dickenmeßgerät** eingesetzt. Die Ausführung nach Bild 4.2. arbeitet nach dem Transformatorprinzip.

Der durch die Primärwicklungen der Transformatoren I und II fließende konstantgehaltene Wechselstrom induziert sekundärseitig eine Spannung, deren Größe von dem magnetischen Widerstand des Kreises abhängig ist. Während der Messung bildet das zu prüfende Band das Joch des magnetischen Kreises des Transformators I. Die Banddicke beeinflusst somit die Spannung der Sekundärspule des Transformators I. Zur Bildung des Sollwertes liegt ein Vergleichsblech mit

vorgegebener Dicke und gleichen magnetischen Eigenschaften auf den Schenkeln des Transformators II. Schaltet man beide Sekundärspannungen gegeneinander, entspricht die Spannungsdifferenz der Dickenabweichung. Das Anzeigegerät ist ein Drehspulgerät mit Gleichrichter. Rückstände von Schmier- und Kühlmittel auf dem Band haben keinen Einfluß auf die Anzeige. Auch bei dieser Meßeinrichtung ist eine gute Bandführung notwendig.

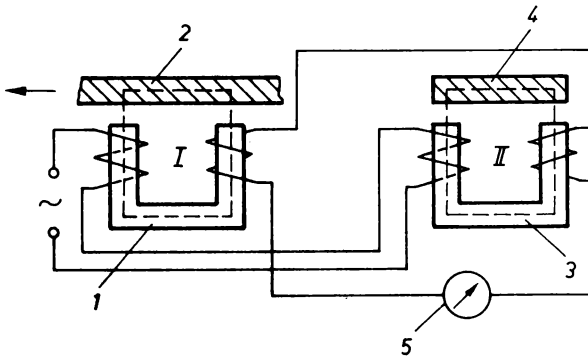


Bild 4.2: Magnetischer Dickenmesser

1 Meßtransformator, 2 Meßgegenstand, 3 Vergleichstransformat, 4 Vergleichsstück, 5 Abweichungsanzeige

Dickenmeßgeräte mit radioaktiven Isotopen stellen geringere Ansprüche an die Bandführung. Sie arbeiten nach dem Prinzip der Strahlungsabsorption, wenn das Meßgut von beiden Seiten zugänglich ist. Sonst kommt nur das Rückstrahlungsprinzip in Frage. Nach Bild 4.3 durchdringen die von der Strahlenquelle ausgesandten Strahlen den Meßgegenstand, wobei eine Strahlungsabsorption entsprechend der Flächenmasse (Flächenmasse = Dicke · Dichte) erfolgt.

Die noch austretende Strahlung wird von einem Strahlungsmeßgerät (Ionisationskammer, Szintillationszähler) erfaßt. Entsprechend der Strahlungsintensität fließt ein Strom, der an einem hochohmigen Widerstand R einen Spannungsabfall (Istspannung) bewirkt. Die Istspannung wird mit einer Sollspannung verglichen. Die Spannungsdifferenz liegt an den Platten eines Schwingkondensators C. Ein Oszillator versetzt diesen in mechanische Schwingungen. Die dabei entstehende Wechselspannung wird mit Hilfe eines Wechselstromverstärkers verstärkt und gleichgerichtet. Das gewonnene Signal ist der Spannungsdifferenz und somit der Abweichung von der Soll-Flächenmasse bzw. bei konstanter Dichte von der Soll-Dicke proportional.

Wegen des Arbeitsschutzes werden vorwiegend Betastrahler angewendet. Die größte Meßempfindlichkeit der Meßeinrichtung liegt im Bereich der Halbwertsflächenmasse bzw. der Halbwertsdicke vor, d. h. wenn durch die Absorption die Strahlung um 50 % geschwächt wird. Somit erweisen sich für jeden Anwendungsfall ganz bestimmte Präparate als günstig (Tafel 1).

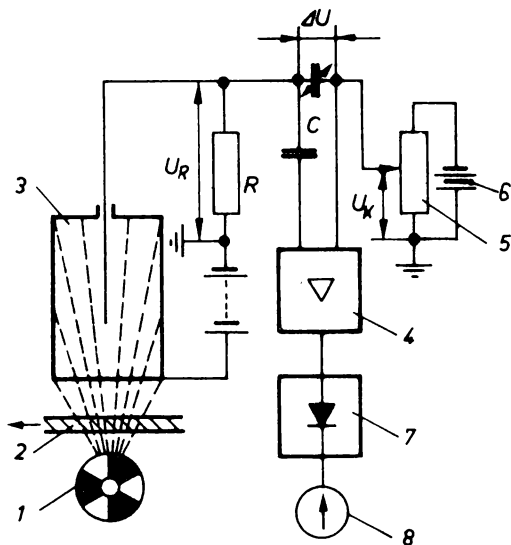


Bild 4.3: Dickenmesser mit radioaktivem Strahler

1 Strahler, 2 Meßgegenstand, 3 Ionisationskammer, 4 Verstärker, 5 Potentiometer, 6 Konstantstromquelle, 7 Gleichrichter, 8 Abweichungsanzeiger

Radionuklid	Symbol	Halbwertszeit $t_{1/2}$	Energie $E_{\max}$	Halbwertsflächenmasse m_A	max. Reichweite in Luft
			MeV	gm^{-2}	m
Tritium	^3H	14,46 a	0,019	2,8	—
Promethium	^{147}Pm	2,6 a	0,22	45	0,4
Krypton	^{85}Kr	10,6 a	0,67	250	2,4
Thallium	^{204}Tl	3,8 a	0,77	330	2,6
Strontium/		28 a	0,54		
Yttrium	$^{90}\text{Sr/Y}$	64 h	2,24	1600	9,5
Ruthenium	^{106}Ru	1 a	3,5	2700	13,2

Tafel 1: Kenndaten der als Beta-Strahler gebräuchlichen Radionuklide

Beispiel:

Für welche Materialdicken aus Stahl und Aluminium ergibt sich die größte Meßempfindlichkeit, wenn der Beta-Strahler Thallium 204 zum Einsatz kommt?

Lösung:

Aus Tafel 1 : Halbwertsflächenmasse $m_A = 330 \text{ g/m}^2$.

$$d_{\text{St}} = \frac{m_A}{\rho_{\text{St}}} = \frac{330 \text{ g/m}^2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/g} \cdot 10^3 \text{ mm/m}}{7850 \text{ kg/m}^3}$$

$$\underline{\underline{d_{\text{St}} = 0,042 \text{ mm}}}$$

$$d_{\text{Al}} = \frac{330 \text{ g/m}^2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/g} \cdot 10^3 \text{ mm/m}}{2700 \text{ kg/m}^3}$$

$$\underline{\underline{d_{\text{Al}} = 0,122 \text{ mm}}}$$

4.2. Breitenmeßverfahren

Zur Messung der Breite (und des Durchmessers) von glühendem oder sich im Gegenlicht befindlichen Meßgegenständen eignet sich eine Meßeinrichtung, die aus Lichtleitkabel bzw. einer Glasfaseroptik besteht (Bild 4.4).

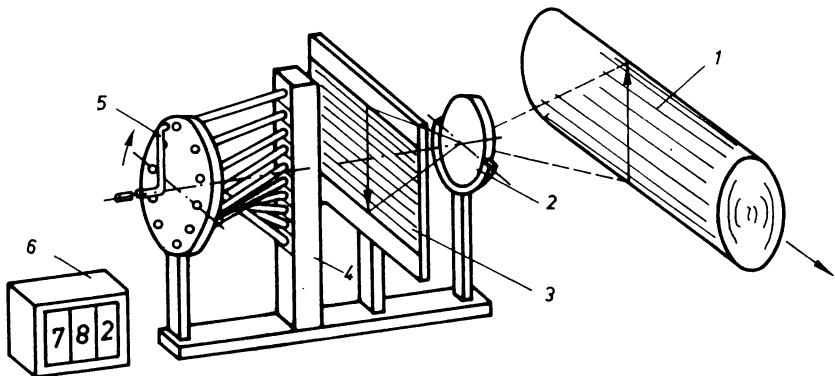


Bild 4.4: Durchmesser-Meßeinrichtung mit Glasfaseroptik

1 glühendes Walzgut, 2 Objektiv, 3 Abbildungsebene, 4 Rastermaßstab, 5 Glasfaserab tastbündel, 6 Auswerteeinheit

Der Meßgegenstand (1) wird mit einer Optik auf einer Projektionsebene abgebildet. Hinter dieser befindet sich ein Maßstab (4) von etwa 100 mm Länge und einem Raster von 0,1 mm in Form eines Kammes aus 1000 dünnen Adern eines Lichtleitkabels von je 0,1 mm Durchmesser. Die Abtastung der belichteten Adern liefert ein Maß für die Dicke des Meßgegenstandes; dazu werden die Enden des Glasfaserbündels auf einer Kreisscheibe verteilt. Ein vor dieser Scheibe rotierendes zweites Glasfaserbündel (5), an dessen Ende sich ein Fotodetektor befindet, tastet bei einem Umlauf nacheinander alle 1000 Lichtleiter ab. Ein elektronischer Zähler speichert den Meßwert. Um die Messung von bewegten Meßgegenständen zu ermöglichen, ist eine periodische Abtastung notwendig. Die erforderlichen Start- und Stopimpulse werden durch Markierungen am Anfang und Ende eines Umlaufes gewonnen. Der Meßbereich wird durch Objektivwechsel eingestellt. Es sind Meßbereiche von 20 mm bis 10 m möglich.

A 9. Wie kann man den Meßbereich eines Breitenmeßgerätes mit einer Glasfaseroptik verändern?

Nach dem Prinzip der Helligkeitskompensation arbeitet das optische Breitenmeßgerät nach Bild 4.5.

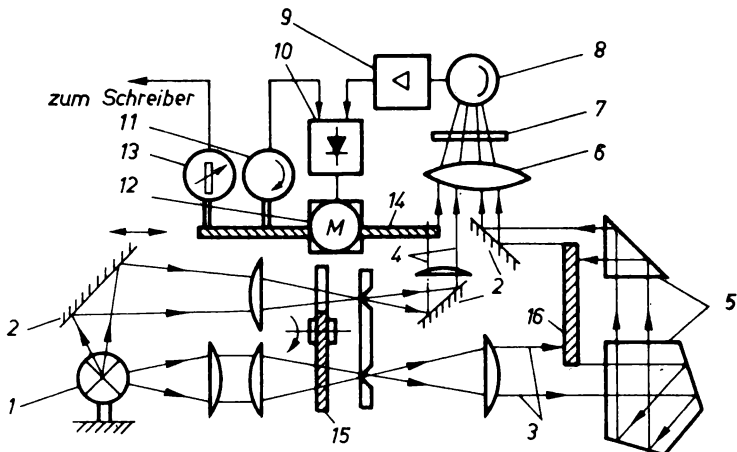


Bild 4.5: Optisches Breitenmeßgerät

1 Lampe, 2 Spiegel, 3 Meßstrahl, 4 Vergleichsstrahl, 5 Prismen, 6 Sammellinse, 7 Streuscheibe, 8 Fotozelle, 9 Verstärker, 10 Gleichrichter, 11 Tachogenerator, 12 Stellmotor, 13 Widerstandsferngeber, 14 Stellblende, 15 Lochblende, 16 Meßgegenstand (Band)

Von einer Lichtquelle werden zwei Lichtstrahlen ausgesandt und abwechselnd durch eine rotierende Schlitzscheibe abgedeckt. Der Meßstrahl wird auf eine Bandkante geworfen; der vom Band nicht zurückgehaltene Teil gelangt über zwei Umlenkprismen auf die andere Bandkante. Der verbleibende Reststrahl, der von der Bandbreite abhängig ist, gelangt über eine Sammellinse und eine Streuscheibe schließlich auf einen Fotoempfänger. Der Vergleichsstrahl, dessen Intensität von einer Stellblende beeinflusst werden kann, fällt ebenfalls auf den Detektor. Haben beide abwechselnd auftreffenden Lichtstrahlen unterschiedliche Intensitäten, dann entsteht eine Wechselspannung, die verstärkt wird und einen Stellmotor ansteuert. Letzterer verstellt die Blende im Vergleichsstrahl solange, bis beide Helligkeiten übereinstimmen. Die Stellung der Blende ist ein Maß für die Bandbreite. Sie wird mit einem Widerstandsferngelager abgegriffen und zur Anzeige gebracht. Die Fehlergrenze wird mit 0,25 mm angegeben.

4.3. Längenmeßverfahren

Die Länge eines bandförmigen oder stabförmigen Meßgegenstandes kann in einfacher Weise mit einem Meßrad bestimmt werden. Die Anzahl der Umläufe ist ein Maß für die Länge. Meßfehler entstehen durch Schlupf und Verschleiß. Für die Messung der Aderlängen in Walzwerken übernimmt die Walze selbst die Aufgabe des Meßrades. Ein mit dem Walzantrieb gekoppelter Impulsgeber liefert Impulse. Eine zusätzliche Fotozelle gibt die Befehle für Beginn und Ende des jeweiligen Zählvorganges. Meßfehler entstehen durch den Schlupf zwischen Walzgut und Walze, durch die Streckung des Stabes infolge des Verformungsprozesses und durch Durchmesseränderung der Walze infolge Verschleiß. Diese Einflußgrößen lassen sich vollkommen eliminieren, wenn man mit Hilfe einer zusätzlichen Eichstrecke die Meßeinrichtung für jede Messung neu einstellt.

In Bild 4.6 ist eine Längenmeßeinrichtung mit drei Fotozellen dargestellt, die nach folgendem Prinzip arbeitet:

Erreicht der Stabkopf des infrarotstrahlenden Walzgutes den Fotodetektor C, dann werden die beiden elektronischen Zähler B und D freigegeben. Sie zählen die vom Impulsgenerator A gelieferten Impulse. Erreicht der Stabkopf den Detektor E, wird der Zähler B gestoppt; die Impulszahl z_B entspricht der bekannten Länge l_1 . Erreicht das Stabende den Detektor F, beendet der Zähler D seinen Zählvorgang. Die Impulszahl z_D entspricht der Walzgutlänge l minus l_2 .

Mit der Proportion $\frac{z_D}{l - l_2} = \frac{z_B}{l_1}$ ist Stablänge

$$l = l_2 + \frac{z_D}{z_B} l_1 \quad (4.1)$$

Die Walzgutgeschwindigkeit geht, wenn sie konstant bleibt, nicht in das Meßergebnis ein. Die auf die größte Meßlänge bezogene Fehlergrenze wird mit 0,5 % angegeben.

Beispiel:

Wie groß ist der durch Temperatureinfluß verursachte relative Fehler, wenn der Meßgegenstand, der aus Stahl sein soll, statt 600 °C eine Temperatur von 700 °C aufweist?

$$\alpha_{St} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

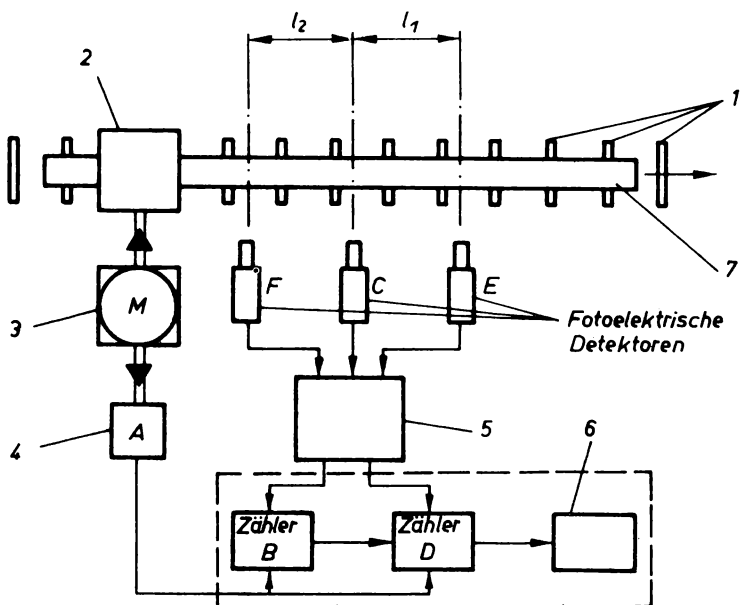


Bild 4.6: Längenmeßeinrichtung mit drei Fotozellen

1 Rollgangsrollen, 2 Walzgerüst, 3 Walzenzugmotor, 4 Impulsgenerator, 5 Steuereinheit für Zähler, 6 Recheneinheit mit Drucker

Lösung:

Die Meßeinrichtung gibt die tatsächliche Länge an. Da die Temperatur von 600 °C bei der Anzeige berücksichtigt wurde, ist der absolute Meßfehler der Längenänderung proportional.

$$F = l_{700} - l_{600} = l_0 \alpha_{St} (\vartheta_{700} - \vartheta_{600})$$

$$\begin{aligned} F_{rel} &= \frac{l_0 \alpha_{St} (\vartheta_{700} - \vartheta_{600})}{l_0 (1 + \alpha \vartheta_{600})} \\ &= \frac{12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 100 \text{ K}}{1 + 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 600 \text{ K}} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{F_{rel} = 0,12 \%}}$$

Die Längenmeßeinrichtung kann getrennt vom Walzgerüst aufgebaut werden, wenn mit Fotodetektoren ein optischer Maßstab nachgebildet wird, dessen Länge größer sein muß als der längste zur Messung in Frage kommende Walzstab. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, wird die Meßeinrichtung mit einer Grob-Fein-Teilung versehen (Bild 4.7). Die Länge der Feinstrecke ist gleich der Entfernung zwischen zwei benachbarten Detektoren der Grobteilung. Der Abstand Y der beiden Gruppen hängt von der zu messenden kleinsten Stablänge ab. Die Feinteilung wird durch die geforderte Meßgenauigkeit bestimmt.

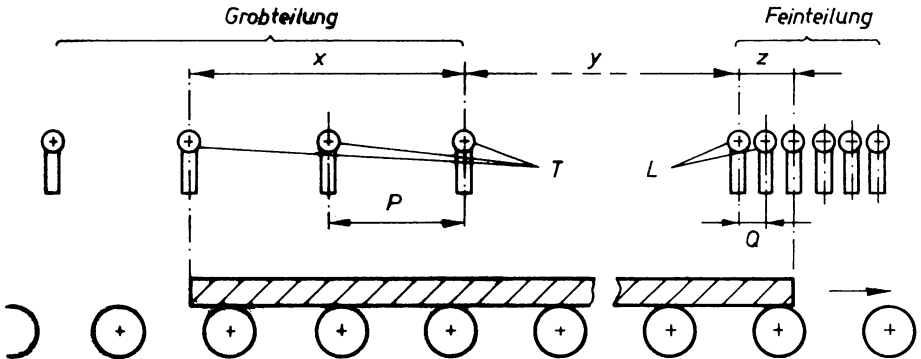


Bild 4.7: Längenmeßeinrichtung mit fotooptischem Grob-Fein-Maßstab

P Abstand der Grobteilung, Q Abstand der Feinteilung, T und L Fotodetektoren

Der Meßvorgang beginnt, wenn der Kopf des auf dem Rollgang transportierten Stabes den ersten Fotodetektor der Feinteilung belichtet, und ist beendet, wenn das Stabende den nächsten Fotodetektor der Grobteilung passiert. Der Belichtungszustand der zwischenliegenden Fotozellen ist in diesem Augenblick das Maß für die Stablänge. Die Längenermittlung erfolgt durch elektronische Addition der Teillängen X , Y und Z , wobei Y ein Festwert ist und die Längen X und Z sich durch Multiplikation mit den Längeneinheiten P und Q ergeben. Der Meßbereich kann bis 100 m ausgelegt werden. Die Fehlergrenze wird mit weniger als 25 mm angegeben.

A 10. Welche Größen beeinflussen den Meßfehler, die kleinste und die größte zulässige Länge an einer Längenmeßeinrichtung mit fotooptischem Maßstab!

Zusammenfassung

Bei der Erfassung der geometrischen Abmessungen von Halb- und Fertigprodukten sind die berührungslos arbeitenden Geräte den mit Berührung arbeitenden überlegen.

Zur Dickenmessung band- oder tafelförmiger Körper eignen sich analoge Geräte, die nach mechanischen, magnetischen oder radioaktiven Prinzipien arbeiten.

Zur Messung der Breite werden optische Verfahren eingesetzt.

Zur Messung der Länge stabförmiger Körper oder Tafeln werden digital arbeitende Geräte verwendet. Beschrieben werden Meßeinrichtungen mit Eichstrecke sowie mit Grob-Fein-Maßstab.

Übungen:

- 4.1. Erläutern Sie die Vorzüge und das Prinzip der magnetischen Dickenmessung!
- 4.2. Warum sind Dickenmeßgeräte mit radioaktivem Strahler nicht universell für alle Dickenmeßbereiche einsetzbar?
- 4.3. Auf welche Weise kann man mit dem Breitenmeßgerät nach dem Prinzip des Helligkeitsvergleiches an einem Meßgegenstand messen, der eine eigene Infrarotstrahlung besitzt?
- 4.4. Warum ist bei einem Längenmeßgerät, das mit einem Meßrad versehen ist, eine Vergleichsstrecke erforderlich?

5. Behälterstand /4/, /5/, /7/, /17/

Die Kontrolle der Standhöhe von Flüssigkeiten oder Schüttgütern in offenen und geschlossenen Behältern ist in der Betriebspraxis eine oft gestellte Meßaufgabe. Die Niveaumessung kann im Behälter selbst oder in einem Standrohr (Prinzip der kommunizierenden Gefäße) vorgenommen werden. Für Bilanzierungszwecke wird bei stehenden zylindrischen oder prismatischen Behältern direkt aus der Standhöhe auf das Volumen geschlossen. Bei liegenden zylindrischen oder kugelförmigen Behältern sind zusätzliche Rechenoperationen notwendig, da Niveau und Volumen nicht mehr in einem linearen Zusammenhang stehen.

5.1. Standmessung mittels Schwimmer

Ein Schwimmer mit der Schwerkraft F_S und dem Querschnitt A folgt der Änderung der Standhöhe h (Bild 5.1).

Nach dem Archimedischen Prinzip wird der Schwimmer um die Höhe h_1 in die Flüssigkeit eintauchen. Meßfehler entstehen außerdem durch die infolge Reibung in der Übertragung veränderliche Zugkraft F_Z an der Zugstange. Mit $V_1 = A \cdot h_1$ erhält man aus

$$F_S - F_Z = A \cdot h_1 \cdot \rho \cdot g \quad (5.1)$$

$$h_1 = \frac{F_S - F_Z}{A \cdot \rho \cdot g}$$

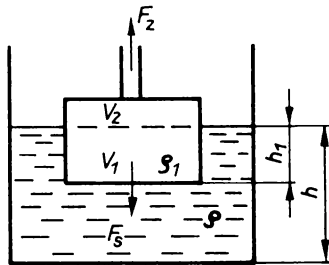


Bild 5.1: Schwimmer als Meßwandler

V_1 verdrängtes Volumen, $V_1 + V_2$ Volumen des Schwimmers, ρ Dichte der Flüssigkeit, ρ_1 Dichte des Schwimmers

Der Einfluß auf die Tauchtiefe und damit der mögliche Meßfehler bleibt gering, wenn die Zugkraft im Verhältnis zur Schwerkraft des Schwimmers klein bleibt und der Schwimmer einen möglichst großen Querschnitt besitzt.

Die Bewegung des Schwimmers kann z. B. in Verbindung mit einem Untersetzungsgetriebe unmittelbar angezeigt oder registriert werden (Schreibpegel). Zur Fernübertragung lassen sich Widerstandsferngeber oder Umsetzerscheiben anbringen.

A 11. Warum soll der Schwimmer eine möglichst große Masse haben?

5.2. Hydrostatische Füllstandsmessung

Der von einer Flüssigkeitssäule hervorgerufene Bodendruck ist unabhängig vom Querschnitt des Behälters:

$$p = \frac{F_S}{A} = \frac{A h \rho g}{A} = h \rho g \quad (5.2)$$

Der Bodendruck ist der Höhe der Flüssigkeitssäule proportional, vorausgesetzt, daß die Dichte konstant bleibt. Kalibriert man das Flüssigkeitsstandmeßgerät in Masseinheiten, ergibt sich eine von der Dichte unabhängige Skale.

Beispiel:

An einem offenen Kaltwasserbehälter soll aus dem Bodendruck auf den Füllstand geschlossen werden. Für welchen Wert ist der Meßbereich des Druckmessers auszulegen, wenn der Behälter 4 m hoch ist?

Lösung:

Mit Gl. (5.2) ist

$$p = h \rho g = 4 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 .$$

$$\underline{\underline{p = 39,24 \text{ kPa}}}$$

Für offene Behälter genügt zur Bodendruckmessung ein einfaches Manometer, das in Bodenhöhe angebracht wird. Für einen geschlossenen Behälter, in dem Überdruck herrscht, ist zu beachten, daß nur der Druckunterschied, der aus der Flüssigkeitssäule entsteht, ein Maß für die Standhöhe ist. Es ist deshalb ein Differenzdruck-Manometer zu verwenden. Eine Druckleitung wird in Bodenhöhe und eine weitere oberhalb des maximalen Flüssigkeitsstandes angeschlossen. Die Anzeige ist aber nur dann richtig, wenn sich das Manometer genau in der Höhe des Behälterbodens befindet. Die Anordnung des Druckmeßgerätes ist jedoch freizügig, wenn man den Behälterstand gegen ein konstantes Bezugsniveau bestimmt (Bild 5.2).

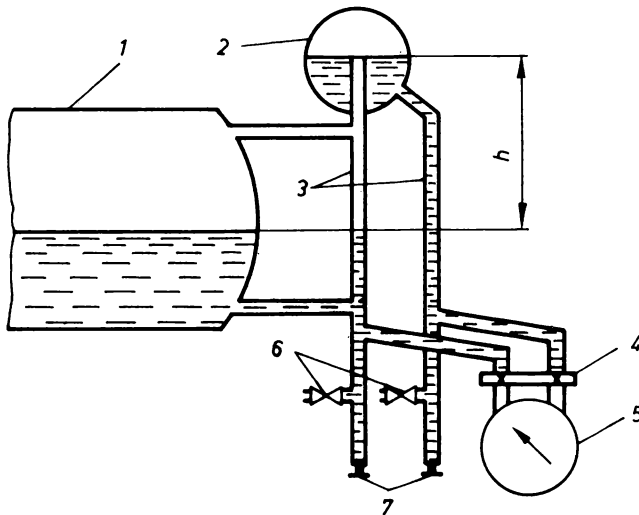


Bild 5.2: Füllstandsanzeige mit Kondensatgefäß

1 Behälter, 2 Kondensatgefäß, 3 Druckleitung, 4 Ventilbatterie, 5 Anzeigegerät, 6 Ausblasseventile, 7 Schlammfang

Bei der Auswahl des Druckmeßgerätes ist die Höhe des Bezugsniveaus zu berücksichtigen.

A 12. Warum ist für eine hydrostatische Füllstandsmessung in geschlossenen Behältern ein Bezugsniveau erforderlich?

5.3. Elektrische Standmessung

Für die Standmessung von Flüssigkeiten und Schüttgütern in offenen oder geschlossenen Behältern ist ein kapazitives Meßverfahren gut geeignet. Die Kapazität C eines Kondensators wird durch seine geometrischen Abmessungen und durch das zwischen den Platten befindliche Dielektrikum bestimmt.

Es gilt

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (5.3)$$

Baut man eine zylindrische oder rechteckige Elektrode senkrecht in einen Behälter ein (Bild 5.3), so erhält man durch das Füllgut die Parallelschaltung eines Luftkondensators mit der Höhe $h_0 - h$ und eines Flüssigkeitskondensators mit der Höhe h . Aus $C_{\text{ges}} = C_{\text{Luft}} + C_{\text{F}}$ erhält man die Kapazitätsänderung

$$\Delta C = C_{\text{Luft}} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1 \right) \frac{h}{h_0} \quad (5.4)$$

Die Kennlinie des Meßwandlers ist linear.

Die Umwandlung der Kapazitätsänderung in eine elektrische Spannung erfolgt mit Hilfe einer Kapazitätsmeßbrücke. Die Länge der Meßleitung ist möglichst klein zu halten, da die Kapazität der Leitung und der Isolationswiderstand elektrisch zum Meßwandler parallel geschaltet sind.

Beispiel:

Die Platten eines Kondensators haben die Fläche von $0,1 \text{ m}^2$ und den Abstand von 5 cm .

- a) Wie groß ist die Kapazität in Luft?
- b) Wie groß ist die Kapazitätsänderung bei halber Füllhöhe?

$$(\epsilon_r = 3,2)$$

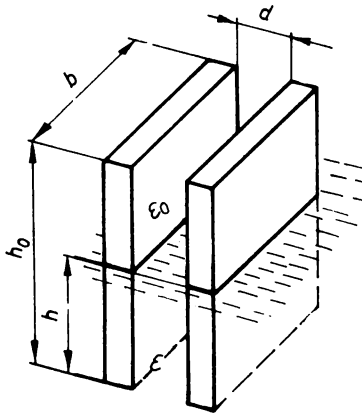


Bild 5.3: Plattenkondensator als Füllstandsmesser

h_0 Sondenhöhe, h Standhöhe, d Abstand, b Breite ϵ Dielektrizitätskonstante

Lösung:

a) Mit Gl. (5.3)

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{0,1 \text{ m}^2}{0,05 \text{ m}}$$

$$\underline{\underline{C = 17,72 \text{ pF}}}$$

b) Mit Gl. (5.4), wobei $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ eingesetzt wird:

$$\Delta C = 17,72 \left(\frac{3,2}{1} - 1 \right) 0,5$$

$$\underline{\underline{\Delta C = 19,5 \text{ pF}}}$$

5.4. Füllstandsmessung mit Radionukliden

In Fällen, in denen die bisher beschriebenen Standmeßverfahren nicht einsetzbar sind (hohe Temperaturen, hohe Drücke, aggressive Stoffe usw.), werden radioaktive Meßverfahren benutzt.

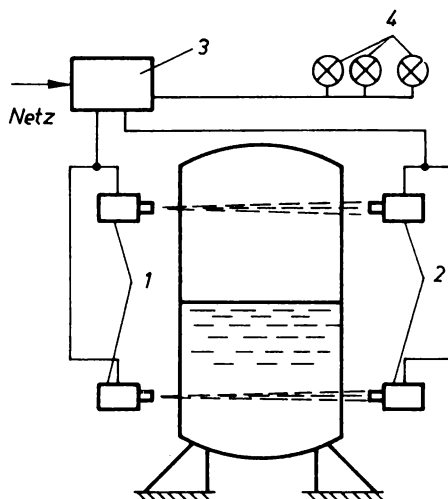


Bild 5.4: Füllstandsmeßeinrichtung mit γ -Relais

1 Isotopenköpfe, 2 Meßköpfe, 3 Verteiler, 4 Signalanlage

In der Meßanordnung nach Bild 5.4 durchdringt die von einem Strahler ausgesandte harte Gammastrahlung die Behälterwandung. Die Strahlung wird beim Vorhandensein von Füllgut stark geschwächt. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Strahlungsmessgerät (Zählrohr, Ionisationskammer oder Szintillationszähler). Sinkt der Flüssigkeitsstand ab, trifft die ungeschwächte Strahlung auf den Strahlungsempfänger. Dieses Verfahren hat also ausgesprochenes Zweipunktverhalten.

Kontinuierliche Füllstandsmeßgeräte lassen sich mit Radionukliden nur mit größerem Aufwand herstellen.

Zusammenfassung

Der Niveaustand von Flüssigkeiten und Schüttgütern ist eine Abbaugröße für die Menge. Standmeßverfahren mit Schwimmer und das hydrostatische Verfahren eignen sich für Flüssigkeiten. Das Prinzip des Plattenkondensators und das Durchstrahlungsprinzip mit Radionukliden kann auch für Schüttgüter verwendet werden.

Übungen

- 5.1. Wie muß die Behälterform gestaltet sein, wenn der Füllstand ein Maß für das Füllvolumen sein soll?
- 5.2. Auf welcher Abhängigkeit beruht die kapazitive Füllstandsmessung?
- 5.3. Nach welchem Prinzip arbeitet das Standmeßverfahren mit Radionukliden?
- 5.4. Bei welchen Meßverfahren geht die Dichte des Füllgutes unmittelbar in das Meßergebnis ein?
- 5.5. Ein Plattenkondensator von 2 m Höhe hat in Luft eine Kapazität von 20 pF. Wie groß ist die Kapazität bei halber Füllhöhe? Das Füllgut sei Mineralöl mit $\epsilon_r = 2,2$.

6. Kraft- und Drehmoment /1/, /3/, /5/

Zur Kontrolle der Belastung von Maschinen, Hebezeugen, Fahrzeugen u. a. haben Kraft- und Drehmomentenmeßgeräte große Bedeutung.

6.1. Kraftmeßverfahren

Die mechanischen Kraftmeßgeräte zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau aus. Beim Kraftmeßbügel erzeugt die einwirkende Kraft eine elastische Verformung des ringförmigen Federkörpers (Bild 6.1). Diese wird mit einer mechanischen Feinmeßuhr angezeigt.

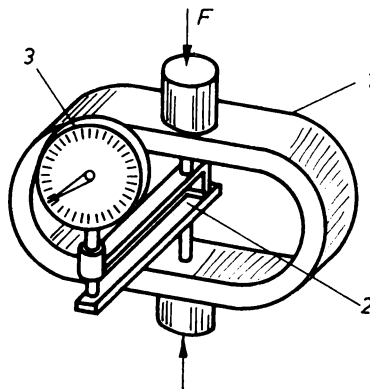


Bild 6.1: Mechanische Kraftmeßeinrichtung

1 Kraftmeßbügel, 2 Übersetzungshebel, 3 Feinmeßuhr

Der Kraftmeßbügel läßt sich für wenige Megapond bis einige hundert Megapond auslegen. Die erreichbare Fehlerklasse ist ≥ 1 . Für den Betriebseinsatz ist die örtliche Anzeige von Nachteil. Der Meßkörper besitzt relativ große Abmessungen und ist nicht gegen die Einwirkung von Feuchtigkeit und Schmutz geschützt.

A 13. Wie könnte man das Ausgangssignal des mechanischen Kraftmeßbügels zur Fernübertragung umformen?

Beim hydraulischen Kraftmeßgeber befindet sich ein Kolben in einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Gefäß (Bild 6.2).

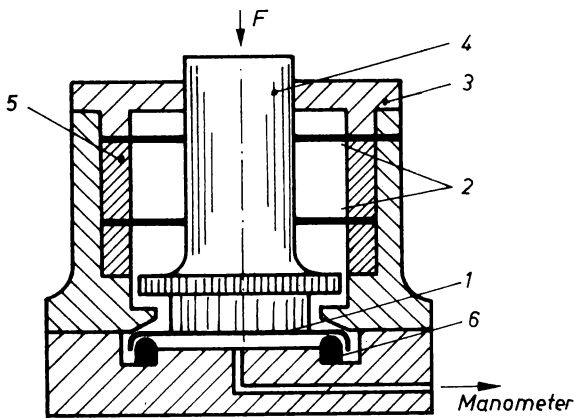


Bild 6.2: Hydraulische Kraftmeßdose

1 Membran zur Abdichtung des Druckraumes, 2 Stahlmembran zur Parallelführung, 3 Abschlußdeckel, 4 Kolben, 5 Zwischenstücke, 6 Paßstück

Wirkt auf dem Kolben mit der Fläche A die zu messende Kraft, entsteht in der Flüssigkeit ein hydrostatischer Druck

$$p = \frac{F}{A} \quad , \quad (6.1)$$

der mit einem Manometer gemessen werden kann. Probleme entstehen bei der Abdichtung und durch die Reibung an der Wandung des Kolbens.
 Das Abdichtungsproblem läßt sich umgehen, wenn an Stelle der Flüssigkeit eine plastische Masse eingefüllt oder als Ersatz für Kolbenringe bzw. Lippendichtungen eine Membrane verwendet wird. Zur Vermeidung der Wandreibung können Federblätter oder Stahlmembranen zur Parallelführung eingebaut werden. Die Meßbereiche liegen zwischen 0,01 MN und 100 MN.

Beispiel:

Wie groß ist der Durchmesser des Kolbens auszuführen, wenn eine Kraft von 2,5 MN wirkt und der Innendruck 10 MPa nicht überschreiten soll?

Lösung:

Mit Gl. (6.1)

$$A_{\text{erf}} = \frac{F}{p} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \text{ N}}{10 \cdot 10^6 \text{ Pa}}$$

$$A_{\text{erf}} = 0,25 \text{ m}^2$$

$$\underline{\underline{D = 565 \text{ mm}}}$$

A 14. Warum ist das Meßsignal der hydraulischen Kraftmeßdose nur zur Überbrückung geringer Entfernungen geeignet?

Bei der **induktiven Kraftmeßdose** wirkt die Kraft in Längsrichtung auf einen Hohlzylinder als Federkörper, der um den kleinen Weg Δl elastisch verlängert oder verkürzt wird. Innerhalb des elastischen Bereiches gilt die Beziehung

$$\Delta l = \frac{F}{A \cdot E} \cdot l, \tag{6.2}$$

wobei E den Elastizitätsmodul (für Stahl: E = 205 GPa) und l die Länge bzw. Höhe des Federkörpers bedeuten. Die Verschiebung l wird mit Hilfe eines induktiven Meßwandlers in eine Induktivitätsänderung ΔL umgeformt. Eine konstruktive Lösung mit einem induktiven Differentialwandler mit Queranker zeigt Bild 6.3.

Die Umwandlung der Induktivitätsänderung in eine zur Anzeige geeignete elektrische Spannung erfolgt in einer Meßbrücke. In den Brückenzweigen befinden sich zwei Festwiderstände R und die zwei gegensinnig veränderlichen Induktivitäten L. Es ergibt sich folgende Wandlungskette:

$$F \longrightarrow \sigma \longrightarrow \Delta l \longrightarrow \Delta L \longrightarrow U.$$

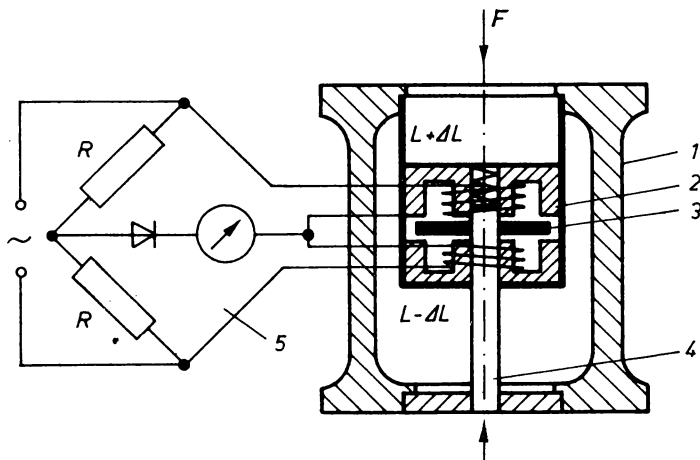


Bild 6.3: Induktive Kraftmeßdose

1 Federkörper, 2 Spulengehäuse, 3 Ankerscheibe, 4 Übertragungsstift

Die Ausführung des Federkörpers als Hohlzylinder ermöglicht eine kompakte und sehr robuste Bauweise. Der Meßbereich richtet sich im wesentlichen nach den mechanischen Abmessungen (etwa 0,01 MN bis 5 MN).

A 15. Erläutern Sie die Wirkungsweise der Meßschaltung für die induktive Kraftmeßdose (Ausgangssignal: Leerlaufspannung).

Bei der Kraftmeßdose mit Dehnungsmeißstreifen wirkt die Kraft ebenfalls auf einen Hohlzylinder als Federkörper. Dehnungsmeißstreifen sind Meßwandler, die aus einem schleifenförmig gewickelten dünnen Draht (Drahtmeißstreifen), aus einer schleifenförmig angeordneten Widerstandsschicht (Folienmeißstreifen) oder aus einem Halbleiterstäbchen bestehen (Bild 6.4).

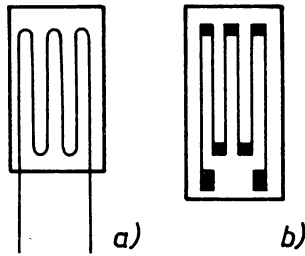


Bild 6.4: Dehnungsmessstreifen

a) Drahtmessstreifen, b) Folienmessstreifen

Wird der auf die Oberfläche des Federkörpers aufgeklebte Dehnungsmessstreifen gezogen oder gestaucht, so ändert er seinen ursprünglichen Widerstand um

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \epsilon \quad (6.3)$$

Darin bedeuten k einen konstanten Faktor (k -Faktor) und ϵ die mechanische Dehnung ($\epsilon = \Delta l / l$).

Den konstruktiven Aufbau einer Kraftmeßdose mit Dehnungsmessstreifen zeigt Bild 6.5 .

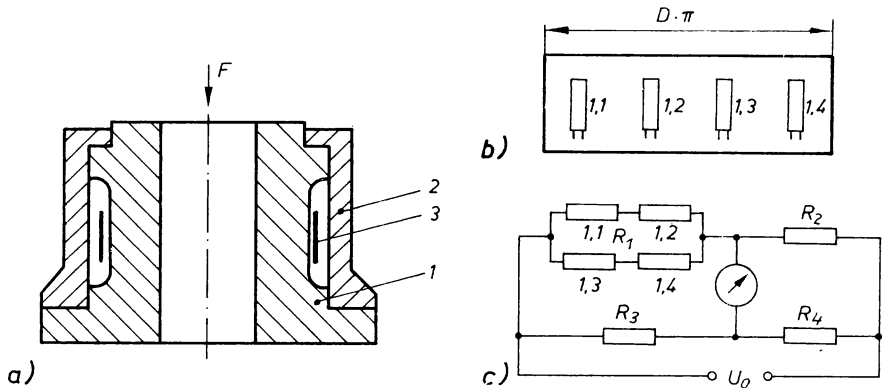


Bild 6.5: Kraftmeßdose mit Streifengeber

- a) konstruktiver Aufbau, 1 Meßzylinder, 2 Schutzmantel, 3 Dehnungsmessstreifen
- b) Mantelabwicklung,
- c) Meßschaltung

Ein Metallmantel schützt die empfindlichen Meßstreifen vor der Einwirkung von Feuchtigkeit und gegen mögliche mechanische Beschädigungen. Zur Umwandlung der Widerstandsänderung in eine elektrische Spannung wird eine Meßbrücke verwendet, die von einer Gleich- oder Wechselspannung gespeist wird. Dabei können zur Mittelwertbildung mehrere Streifen in Reihe, parallel oder in einer gemischten Schaltung angeordnet werden. Die Meßempfindlichkeit wird dabei nicht geändert, da nach der Brückengleichung für das Meßergebnis nur das Verhältnis $\Delta R / R$ maßgebend ist. Für die gesamte Meßeinrichtung ergibt sich folgende Wandlungskette:

$$F \longrightarrow \sigma \longrightarrow \epsilon \longrightarrow \Delta R \longrightarrow U.$$

Dabei errechnet sich die Brückenleerlaufspannung aus nachstehender Beziehung, wenn ein symmetrischer Aufbau ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$) und nur eine schwache Verstimung ($\Delta R \ll R$) vorausgesetzt wird:

$$U_l = U_o \frac{\Delta R}{4 R} = U_o \frac{k \epsilon}{4} \quad (6.4)$$

In den Zweigen 2, 3 und 4 befinden sich Festwiderstände.

Der Meßbereich richtet sich im wesentlichen nach den mechanischen Abmessungen (ca. 0,01 MN bis 10 MN).

Beispiel:

Eine Kraftmeßdose aus Stahl für eine Nennlast von 5 MN ist so gestaltet, daß gerade die mechanische Nennspannung von $\sigma = 244 \text{ MPa}$ erreicht wird.

- Wie groß ist die Dehnung in der Längsachse?
 - Wie groß ist die Brückenleerlaufspannung am Ende des Meßbereiches, wenn im Zweig 1 vier Meßstreifen in Reihe geschaltet werden und die Speisespannung 8 V beträgt?
- $R_{St} = 120 \Omega$, $k = 2,0$.

Lösung:

$$\text{Zu a)} \quad \epsilon = \sigma / E = \frac{244 \text{ MPa}}{205 \cdot \text{GPa}} = \underline{\underline{1,19 \cdot 10^{-3}}}$$

Zu b) Mit GL (6.4)

$$U_l = 8000 \text{ mV} \frac{2,0 \cdot 1,19 \cdot 10^{-3}}{4} = \underline{\underline{4,76 \text{ mV}}}$$

Das **magnetoelastische Kraftmeßverfahren** beruht auf der Abhängigkeit der Permeabilität ferromagnetischer Materialien von der mechanischen Beanspruchung. Die magnetoelastische Kraftmeßdose besteht aus einem rechteckigen Körper, der aus geschichtetem ferromagnetischen Material aufgebaut ist (Bild 6.6 a). Das Meßelement trägt drei Wicklungen (Bild 6.6 b). Die Primärwicklung 4, die unter einem Winkel von 45° angeordnet ist, wird mit konstantem Wechselstrom gespeist.

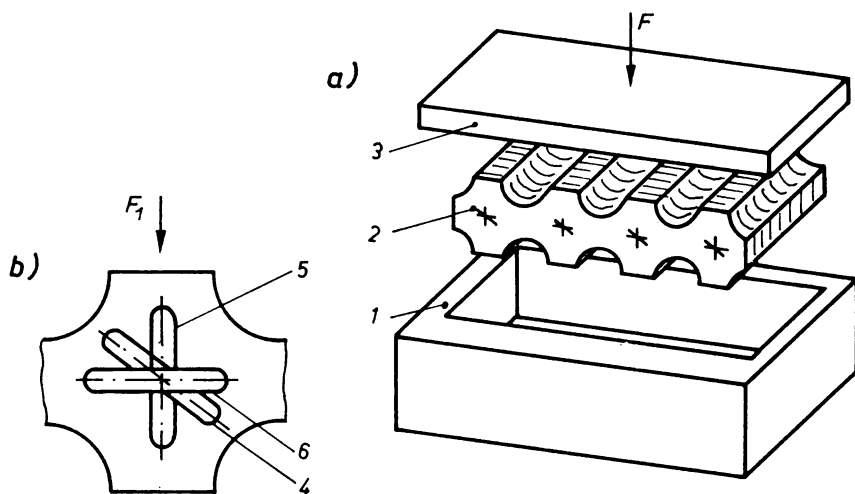


Bild 6.6: Magnetoelastische Kraftmeßdose

a) konstruktiver Aufbau

1 Schutzgehäuse, 2 Meßwandler, 3 Krafteinleitungsstück

b) Meßelement

4 Primärwicklung, 5 und 6 Sekundärwicklungen

Wirkt auf den Meßkörper keine Druckkraft, sind die Kopplungsfaktoren zu beiden Sekundärwicklungen 5 und 6 gleich groß. In beiden Spulen werden gleich große Spannungen induziert. Die Spannungsdifferenz ist Null. Wirkt jedoch die Kraft F , sind die beiden Sekundärspannungen unterschiedlich. Die entstehende Spannungsdifferenz ist proportional zur Belastung.

Diese Kraftmeßdosen sind auch für rauen Betriebseinsatz geeignet. Vorteilhaft ist, daß kein Meßverstärker benötigt wird. Die Meßbereiche liegen zwischen 0,063 und 10 MN. Der Grundfehler beträgt etwa 1 %.

6.2. Drehmomentmeßverfahren

Zur Messung von Drehmomenten ist prinzipiell jede Kupplungswelle geeignet. Beim **magnetoelastischen Meßverfahren** wird der Meßwandler in geringem Abstand von 2...3 mm vor der Welle feststehend angebracht (Bild 6.7).

Das Drehmoment bewirkt unter einem Winkel von $\pm 45^\circ$ zur Wellenachse die mechanischen Hauptspannungen $\pm \sigma$.

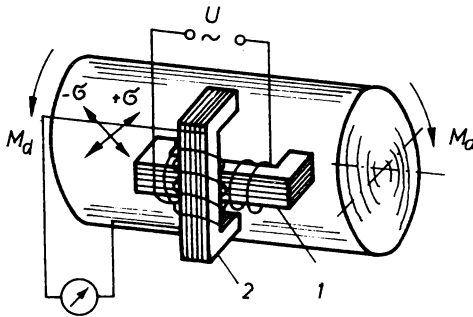


Bild 6.7: Prinzip des Kreuztorduktors

1 Meßspule, 2 Erregerspule

Wurde durch eine parallel zur Achse liegende Magnetspule in der Wellenoberfläche ein symmetrisches Magnetfeld induziert, erfolgt jetzt eine Verlagerung des magnetischen Flusses in Richtung der Druckbeanspruchung. Das kommt einer Drehung des Magnetflusses gleich. Ordnet man senkrecht zur Erregerspule eine Meßspule an, dann ist im unbelasteten Zustand die Kopplung Null. Wird jedoch die Welle durch ein mechanisches Moment beansprucht, durchdringt ein Teil des Flusses den Eisenkern der Sekundärspule und induziert dort eine Spannung, die dem Drehmoment proportional ist und als Meßsignal dient.

Beim Drehmomentmeßverfahren mit Dehnungsmessstreifen werden die Meßstreifen unter einem Winkel von $\pm 45^\circ$ zur Wellenachse, d. h. in der Richtung der Hauptspannungen, auf die Wellenoberfläche aufgeklebt (Bild 6.8).

Die Hauptspannungen erzeugen im Bereich der elastischen Umformung die Dehnung

$$\epsilon_{\pm 45^\circ} = \frac{M_d}{2 W_p G} \quad (6.5)$$

Darin bedeuten

W_p das polare Widerstandsmoment und

G den Gleitmodul

(für Stahl $G = 79,5 \cdot \text{GPa}$).

Die Dehnung wird somit durch die Meßstreifen in eine Widerstandsänderung und mit Hilfe einer Meßbrücke in eine elektrische Spannung umgewandelt. Es gilt

$$M_d \longrightarrow \epsilon_{\pm 45^\circ} \longrightarrow \Delta R \longrightarrow U.$$

Die Signalübertragung erfolgt über Schleifringe und Schleifbürsten. Diese werden aus Edelmetall (Silber und Silbergraphit) hergestellt. Jede Änderung des Kontaktwiderstandes täuscht eine scheinbare Änderung der Dehnung bzw. des Drehmomentes vor.

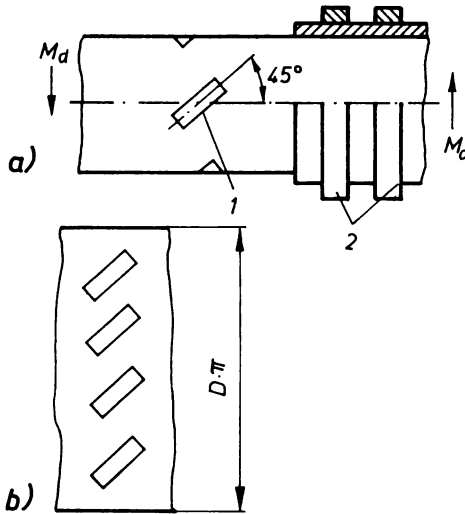


Bild 6.8: Drehmomentenmeßeinrichtung mit Streifengeber

- a) konstruktiver Aufbau
1 Meßstreifen, 2 Schleifringe
b) Mantelabwicklung

Beispiel:

Eine Welle aus Stahl von 135 mm Durchmesser wird durch ein Drehmoment von 9,81 kNm beansprucht.

- a) Wie groß ist die Dehnung der Meßstreifen?
b) Wie groß ist die Widerstandsänderung eines Meßstreifens von 300 Ω und einem k-Faktor von 1,96?

Lösung:

- Zu a) Das polare Widerstandsmoment der Welle errechnet sich näherungsweise aus $W_p \approx 0,2 d^3$.
Somit $W_p = 492 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Mit Gl. (6.5) ist

$$\epsilon_{\pm 45^\circ} = \frac{9,81 \text{ kNm}}{2 \cdot 492 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 79,5 \text{ GPa}}$$

$$\epsilon_{\pm 45^\circ} = 0,125 \cdot 10^{-3} = 0,125 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Zu b) Mit Gl. (6.3) ist

$$\Delta R = 300 \, \Omega \cdot 1,96 \cdot 0,125 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta R = 0,0735 \, \Omega$$

Zusammenfassung

Im Betrieb findet für einfache Meßaufgaben der hydraulische Kraftmeßgeber (die hydraulische Kraftmeßdose) Verwendung. Höheren Ansprüchen werden die elektrischen Meßverfahren gerecht. Das magnetoelastische Verfahren eignet sich besonders für die Betriebskontrolle, da hierzu keine Meßverstärker erforderlich sind. Nahezu universell anwendbar ist das Dehnungsmeßstreifenverfahren. Der kleine Meßfehler ermöglicht den Einsatz in der Wägetechnik.

In der Betriebsmeßtechnik dominieren zwei Verfahren zur Drehmomentenmessung: das magnetoelastische Verfahren und das Meßstreifenverfahren. Bei der Drehmomentenmessung entsteht das zusätzliche Problem der Signalübertragung von der sich drehenden Welle.

Übungen

- 6.1. Welche Kraftmeßverfahren sind für örtliche Messungen geeignet?
- 6.2. Was versteht man unter einer Kraftmeßdose?
- 6.3. Welche Forderung hinsichtlich des Lastangriffes wird bei Kraftmeßdosen gestellt?
- 6.4. Für den Federkörper einer induktiven Kraftmeßdose mit 0,6 MN Nennlast sollen die Hauptabmessungen entworfen werden.
 - a) Wie groß ist der Innendurchmesser?
 $\sigma_{zul} = 280 \text{ MPa}$; Außendurchmesser 80 mm.
 - b) Wie groß ist die Länge des Zylinders aus Stahl, wenn die elastische Verkürzung 0,1 mm betragen soll?
- 6.5. Beschreiben Sie die Meßschaltung der magnetoelastischen Kraftmeßdose!

7. Druck /1/, /2/, /4/, /5/

7.1. Flüssigkeitsmanometer

Die Flüssigkeitsmanometer sind zur Messung von Über-, Unter- und Differenzdrücken geeignet. Bei der Auslegung eines Gerätes für Differenzdruckmessung ist neben dem Meßbereich noch der statische Druck zu berücksichtigen.

Bei dem U-Rohr-Manometer nach Bild 7.1 wird der Meßbereich durch die maximale Schenkellänge und durch die Dichte der Sperrflüssigkeit bestimmt. Sind die Drücke p_1 und p_2 an den Anschlüssen gleich groß (Differenzdruck gleich Null), dann stellen sich die Menisken der Sperrflüssigkeit auf die Höhe 0-0 ein. Wird jedoch an die Anschlüsse der Differenzdruck $\Delta p = p_1 - p_2$ ($p_1 < p_2$) gelegt, sinkt der rechte Meniskus ab, und der linke steigt an. Durch den Höhenunterschied h entsteht ein statischer Gegendruck.

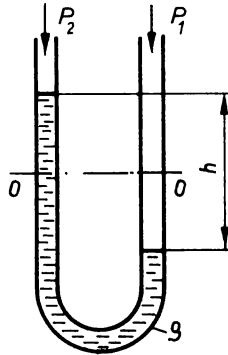


Bild 7.1: U-Rohr-Manometer
h Ausschlag

Im Gleichgewichtsfall gilt

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \rho g \quad (7.1)$$

Nach dem hydrostatischen Paradoxon bleibt der Einfluß der Querschnittsflächen in den Schenkeln des U-Rohres ohne Einfluß. In Gl. (7.1) wurde angenommen, daß die Dichte des zu messenden Mediums gegenüber der Sperrflüssigkeit vernachlässigt werden kann.

Die Meßbereiche industriell gefertigter Geräte reichen von 0 . . . 3 kPa und 0 . . . 130 kPa. Als Sperrflüssigkeiten kommen Alkohol, Wasser und Quecksilber in Frage. Die kleinste Fehlergrenze beträgt etwa 10 Pa.

A 16. Welchen Einfluß hat ein ungleicher Schenkelquerschnitt des U-Rohr-Manometers auf die Anzeige?

Beispiel:

Wie groß ist die Meßempfindlichkeit eines mit Quecksilber gefüllten U-Rohr-Manometers an einer Luftleitung bei 20 °C?

Lösung:

Gemäß der allgemeinen Beziehung

$$E = \frac{d \text{ Wirkung}}{d \text{ Ursache}} = \frac{d h}{d \Delta p}$$

wird Gl. (7.1) nach dem Ausschlag h der Flüssigkeitssäule aufgelöst und nach der Druckdifferenz Δp differenziert.

Man erhält

$$E = \frac{1}{\rho \cdot g} = \frac{1}{13550 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$E = 0,00753 \frac{\text{mm}}{\text{Pa}}$$

U-Rohr-Manometer sind nur zur Anzeige geeignet. Um ein übertragbares Signal zu erhalten, wurden daraus die Schwimmermanometer entwickelt (Bild 7.2), wobei eine Ineinanderschachtelung der Schenkel erfolgte.

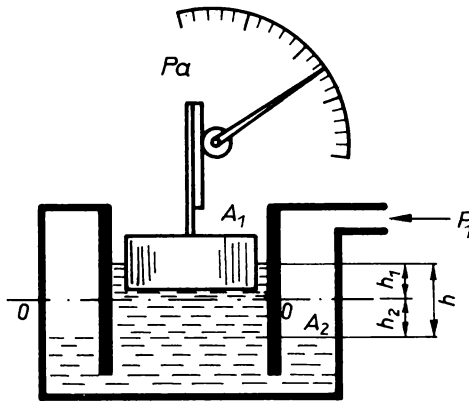


Bild 7.2: Schwimmermanometer

A_1 innerer Kreisquerschnitt, A_2 äußerer Kreisringquerschnitt, h_1 Bewegung des Schwimmers

Die Niveaubewegung des inneren Schenkels wird mittels Schwimmer auf die Anzeige übertragen. Der Ausschlag h_1 ist kleiner als die Niveaudifferenz h . Da die Volumenverschiebung in beiden Schenkeln gleich sein muß, gilt

$$V = h_1 \cdot A_1 = h_2 \cdot A_2 .$$

Daraus folgt

$$h_2 = h_1 \frac{A_1}{A_2} .$$

Mit $h = h_1 + h_2$ läßt sich Gl. (7.1) schreiben

$$\Delta p = h_1 \rho g \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \tag{7.2}$$

Zur Messung von Differenzdrücken ist der Schwimmerraum zu verschließen, damit sich der Druck p_2 , der über einen weiteren Stutzen zugeführt wird, auswirken kann. Meßbereiche für Zug sind (Unterdruck) $(-160 \dots 0)$ Pa und $(-6 \dots 0)$ kPa, für Druck $(0 \dots 160)$ Pa und $(0 \dots 6(10))$ kPa. Die auf den Meßbereich bezogene Fehlergrenze beträgt etwa $1 \dots 1,5 \%$.

A 17. Wie wirkt sich die Verdunstung eines Teiles der Sperrflüssigkeit auf die Anzeige aus?

Die Ringwaage kann zur Meßwertanzeige, zum Registrieren und zur Fernübertragung von Unter-, Über- und Differenzdrücken eingesetzt werden. Die Anzeige ist unabhängig von der Dichte der Sperrflüssigkeit.

Das Gerät besteht aus einem ringförmigen Hohlkörper, der in seinem Schwerpunkt drehbar gelagert ist (Bild 7.3).

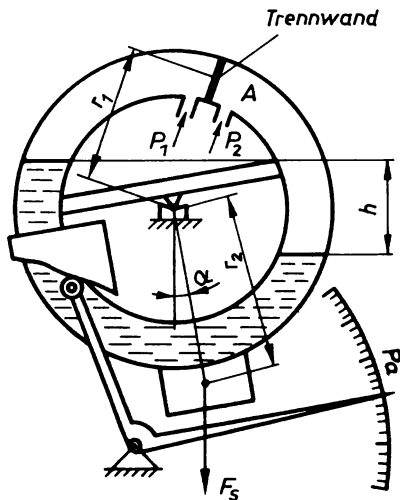


Bild 7.3: Ringwaage

A Querschnitt des Ringrohres, r_1 Abstand des Flächenschwerpunktes
 r_2 Abstand des Massenschwerpunktes

Die Ringkammer besitzt eine Trennwand und ist durch die Sperrflüssigkeit in zwei Räume geteilt. Ist der angelegte Differenzdruck Null, befindet sich der Belastungskörper mit seinem Schwerpunkt senkrecht unter dem Drehpunkt. Führt man dem rechten Anschlußstutzen einen Überdruck zu, wird die Sperrflüssigkeit um die Höhe $h = \frac{\Delta p}{\rho g}$ verschoben. Gleichzeitig übt die Druckdifferenz auf die Trennwand mit dem Querschnitt A eine Kraft aus und erzeugt mit dem Hebelarm r_1 ein inneres Drehmoment $M_i = \Delta p \cdot A \cdot r_1$. Dadurch wird der Schwerpunkt des Gegengewichts aus der Nullage heraus bewegt; es entsteht ein äußeres Rückstellmoment $M_a = F_S r_2 \sin \alpha$, worin r_2 der Abstand des Schwerpunktes des Gegengewichts vom Drehmittelpunkt ist. Für den Gleichgewichtszustand gilt $M_i = M_a$ bzw.

$$\Delta p = \frac{F_S r_2}{A r_1} \sin \alpha \quad (7.3)$$

Die Kennlinie ist nicht linear. In der Praxis wird Linearität zwischen Anzeige und Druck erzielt, indem am Ringkörper eine Kurvenscheibe angebracht wird, die den Zeigerausschlag steuert. Meßbereiche: Zug ($-100 \dots 0$) Pa und ($-25 \dots 0$) kPa, Druck ($0 \dots 100$) Pa und ($0 \dots 25$) kPa. Wird die Ringwaage als Wirkdruckmesser eingesetzt (s. Abschnitt 8.3), kann mit der Kurvenscheibe eine Radizierung vorgenommen werden. Dort wird die Beziehung $Q + K \sqrt{\Delta p}$ realisiert.

A 18. Wie wirkt sich eine Veränderung der Dichte der Sperrflüssigkeit auf die Anzeige aus?

Beispiel:

Eine Ringwaage besitze einen Ringkörper mit einem Querschnitt $A = 50 \text{ cm}^2$. Weiterhin seien $r_1 = 0,17 \text{ m}$, $r_2 = 0,12 \text{ m}$ und $\alpha = 30^\circ$. Wie groß ist die Masse des Belastungskörpers, wenn der Meßbereich 250 Pa betragen soll?

Lösung:

Gl. (7.3) umgestellt

$$F_S = \frac{\Delta p A r_1}{r_2 \sin \alpha} = \frac{250 \text{ Pa} \cdot 50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,17 \text{ m}}{0,12 \text{ m} \cdot 0,5}$$

$$F_S = 3,54 \text{ N}$$

$$m = \underline{\underline{360 \text{ g}}}$$

7.2. Federmanometer

Federmanometer kommen ohne Sperrflüssigkeit aus. Der Druck wirkt auf einen metallischen Körper und verformt diesen elastisch.

Bei dem Röhrenfedermanometer ist das Umformglied ein kreisförmig gebogenes, einseitig geschlossenes Rohr mit meist elliptischem Querschnitt. Der zu messende Überdruck im Inneren ruft eine Aufbiegung hervor (Bild 7.4). Der an dem freien Ende entstehende Federweg kann 5 ... 15 mm betragen. Er wird über ein Hebelsystem in Verbindung mit einem Zahnsegment in eine Drehbewegung (meist 270°) umgeformt.

Dieser Manometertyp wird meist zur Messung von mittleren und höheren Drücken eingesetzt. Die auf den Meßbereich bezogene Fehlergrenze wird mit 0,6 ... 2,5 % angegeben. Werden am Skalenblatt Kontakte für obere und untere Grenzwerte angebracht, läßt sich das Röhrenfedermanometer als Meßwandler für Zweipunkt-Druckregelungen benutzen.

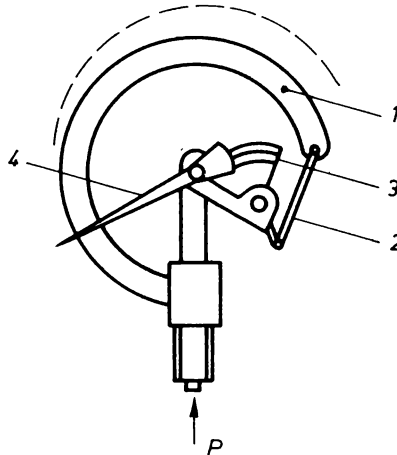


Bild 7.4: Röhrenfedermanometer

1 Rohrfeder, 2 Zugstange, 3 Zahnsegment, 4 Zeiger

Bei dem Plattenfedermanometer ist das Umformglied eine kreisförmig eingespannte Platte (Bild 7.5). Der zu messende Druck wirkt auf die Unterseite. Um lineare Beziehungen zwischen Druck und Plattendurchbiegung zu erreichen, hat die Platte eine Anzahl konzentrischer Rillen. Gleichzeitig ergibt sich eine gute Nullpunktstabilität. Die Plattendurchbiegung wird über ein Hebelsystem in Verbindung mit einem Zahnsegment in eine Drehbewegung umgewandelt. Bei einer möglichen Überlastung legt sich die Platte an das Oberteil des Gehäuses an (Schutzeffekt). Durch einen geeigneten Überzug kann man die Platte gegen Korrosion schützen.

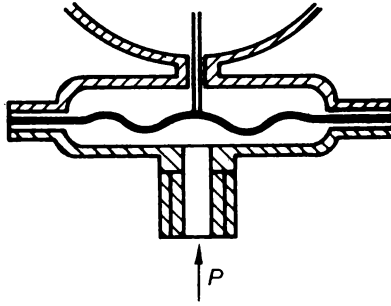


Bild 7.5: Plattenfedermanometer

Bei einer Überschreitung der Elastizitätsgrenze des Federkörpers geht der Zeiger nicht mehr in die Nullage zurück. Die Vorschrift besagt, daß die Geräte im Dauerbetrieb bei statischer Belastung nicht höher als $2/3$ und bei dynamischer Last nicht höher als bis zur Hälfte des Skalenendwertes belastet werden dürfen.

Betriebsmanometer, die eine Fehlerklasse von 2 haben, können für folgende Meßbereiche ausgelegt werden: Unterdruck ($-0,1 \dots 0$) MPa und ($-2,5 \dots 0$) kPa, Überdruck ($0 \dots 2,5$) kPa und ($0 \dots 2,5$) MPa, Differenzdruck ($0 \dots 16$) kPa und ($0 \dots 0,4$) MPa bei einem statischen Druck von maximal 2,5 MPa.

Zusammenfassung

Druckmeßgeräte für die Betriebspraxis sind vorwiegend Flüssigkeitsmanometer und Federmanometer (Tafel 2).

Flüssigkeitsmanometer sind für ortsfesten Einbau und zur Messung relativ kleiner Drücke bzw. Differenzdrücke geeignet. Weit verbreitet ist gegenwärtig noch die Ringwaage. Mit ihrer Hilfe können die Meßwerte angezeigt, registriert oder fernübertragen werden.

Federmanometer zeichnen sich durch kleine Abmessungen aus und sind nicht lageempfindlich.

Druckmeßumformer für Einheitsysteme werden heute überwiegend mit federelastischen Meßgliedern ausgerüstet, da sie auch gute dynamische Eigenschaften aufweisen.

Übungen

- 7.1. Bei welchen Meßgeräten hat die Dichteänderung der Sperrflüssigkeit Einfluß auf das Meßergebnis?
- 7.2. Welcher Gefahr sind Flüssigkeitsmanometer bei Einbau in ungeheizten Räumen im Winter ausgesetzt?
- 7.3. Welcher relative Fehler entsteht, wenn bei einem U-Rohr-Manometer die Sperrflüssigkeit (Wasser) von 4°C auf 40°C erwärmt wird? $\rho_{40^\circ\text{C}} = 0,9922 \text{ kg/m}^3$
- 7.4. Durch welche Maßnahmen kann man Fehler durch Temperatureinwirkungen bei einer Druckmessung von Heißdampf vermeiden?

Bezeichnung	analoger elektri- scher Abgriff	dynam. Ver- halten	Unter-	Über-	Diff.-
			Druck		
Flüssigkeits-Manometer					
U-Rohr-Manometer	—	—	x	x	x
Schrägrohr-Manometer	—	—	x	x	x
Schwimmer-Manometer	—	—	x	x	(x)
Tauchglocken-Manometer	(x)	—	x	x	—
Ringwaage	x	be- trie- bi- gend	x	x	x
Federmanometer					
Röhren-Federmanometer	x	gut	x	x	—
Platten-Federmanometer	x	gut	x	x	x
Kapsel-Federmanometer	(x)	gut	x	x	—
Balg-Federmanometer	x	gut	x	x	(x)

Tafel 2: Zusammenstellung der Eigenschaften von Flüssigkeits- und Federmanometern

8. Menge und Durchfluß /1/, /2/, /4/, /12/, /13/

Eine Stoffmenge ist entweder durch das von ihr eingenommene Volumen oder durch ihre Masse bestimmt. Zur kontinuierlichen Messung des Volumens dienen Zähler (Flüssigkeits- und Gaszähler) und zur Erfassung der Massen Waagen. Die auf die Zeiteinheit bezogene Stoffmenge heißt Durchfluß oder Mengenstrom. Dabei unterscheidet man den Volumendurchfluß (m^3/h) und den Massedurchfluß (kg/h).

8.1. Wägeverfahren

Die bekannteste Ausführung ist die **Brückenwaage** (Bild 8.1).

Die Last steht auf einer waagerechten Plattform, der Brücke. Die Lagerung der Plattform erfolgt in Schneiden. Um Beschädigungen zu vermeiden, wird die Brücke zur Entlastung angehoben oder der Mechanismus abgesenkt.

Beispiel:

Es ist nachzuweisen, daß in Bild 8.1 b) die Kraft an der Koppelstange unabhängig von der Stellung des Wägegutes allein eine Funktion der Masse ist.

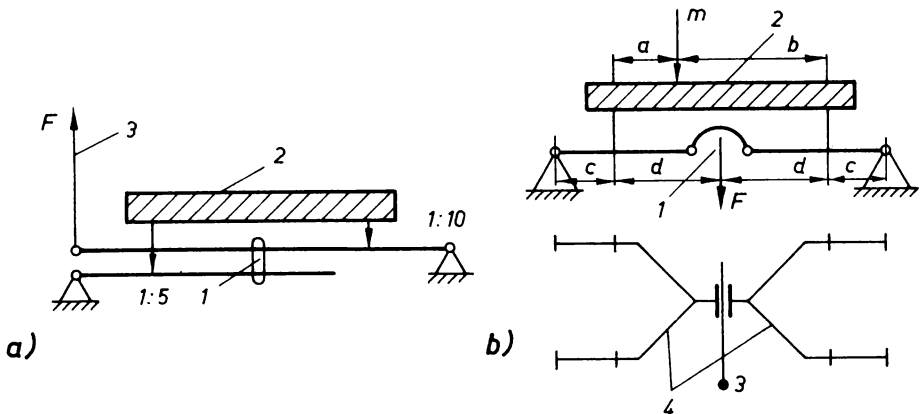


Bild 8.1: Brückenwaagen

a) Dezimalwaage, b) Gleiswaage

1 Koppel, 2 Brücke, 3 Zugstange, 4 Lasthebel

Lösung:

Mit Hilfe der Hebelgesetze gilt, wobei die Drehpunkte in die Auflager gelegt werden:

$$F = m \cdot g \frac{a+c}{c+d} + m \cdot g \frac{b+c}{c+d}$$

$$F = \frac{2c+a+b}{c+d} m \cdot g$$

Da c und d konstruktive Festwerte sind und die Summe von $a + b$ unabhängig von der Stellung des Wägegutes ist, gilt $F = f(m)$.

Die Anzeigeeinrichtung kann nach der Kompensationsmethode (Dezimalwaage, Laufgewichtswaage) oder nach der Ausschlagmethode (Neigungswaage) arbeiten.

Das Prinzip der Neigungswaage ist in Bild 8.2 dargestellt. Hierbei wird bei Belastung der Waage eine Gegenmasse, die an einem Hebel aufgehängt ist, soweit aus der Nullage heraus bewegt, bis das äußere Moment M_a dem inneren Moment M_i das Gleichgewicht hält.

Nach Art der Anzeige unterteilt man die Neigungswaagen in Waagen mit mechanischem Zeiger (Rundzeigerkopf) und in solche mit optischer Anzeige (Leuchtbildanzeige). Nach Bedarf können verschiedenartige Zusatzeinrichtungen zur Steuerung von Dosierungsvorgängen oder zur Fernübertragung angebracht werden. Wird ein Stoff im kontinuierlichen Strom auf einem Gurt- oder Plattenband transportiert, benutzt man **Bandwaagen**. In Bild 8.3 ist eine Ausführung als elektrische Förderbandwaage zu sehen.

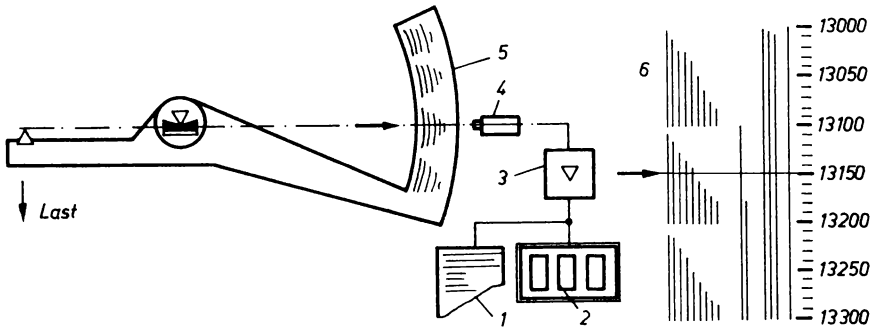


Bild 8.2: Abgriffssystem einer Neigungswaage

1 Buchungsautomat, 2 Druckwerk, 3 Verstärker, 4 Fotodetektor, 5 Neigungshebel, 6 Kodiersystem

Von den Tragrollen des Förderbandes wird eine als Meßrolle verwendet. Man erhält eine Information über die Masse auf der Meßstrecke, z. B. q in kg/m. Um die gesamte Masse zu erhalten, ist der gesamte Weg, der vom Förderband zurückgelegt wird, zu berücksichtigen. Das Problem läßt sich technisch mit Hilfe eines mechanischen Integrators (Integrationskegel) lösen.

$$m = \int_{s_1}^{s_2} q \cdot ds \quad (8.1)$$

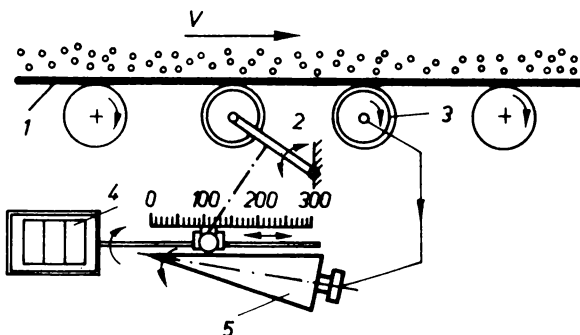


Bild 8.3: Prinzip einer elektrischen Förderbandwaage

1 Förderband, 2 Kraftgeber, 3 Weggeber, 4 Zähler, 5 Integrationskegel

Beispiel:

Wie groß ist die auf einem Band transportierte Gesamtmasse, wenn durch die Meßrolle eine durchschnittliche Metermasse von $q = 100 \text{ kg/m}$ angezeigt wurde und die wirksame Bandlänge 100 m beträgt?

Lösung: Mit Gl. (8.1) wird

$$m = \int q \cdot ds = q s$$

$$m = 100 \text{ kg/m} \cdot 100 \text{ m} = \underline{\underline{10000 \text{ kg}}}$$

Bei elektrischen Waagen entfällt das mechanische Hebelsystem, da eine oder mehrere Kraftmeßdosen Verwendung finden. Die Wägung erfolgt also ohne bewegte Teile, die Robustheit und die Freizügigkeit in der konstruktiven Ausführung werden größer, die Abmessungen des lastaufnehmenden Teils wesentlich kleiner. Bild 8.4 zeigt die konstruktive Lösung des Wägevorganges an einer Gießpfanne. Hierbei wurden zwei Kraftmeßdosen in die Aufhängung des Hakeneschirrs eingebaut.

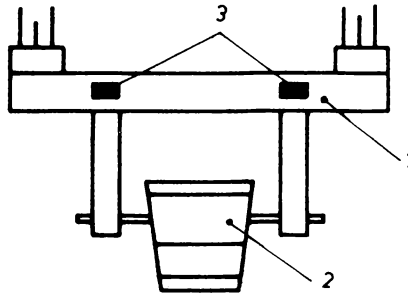


Bild 8.4: Elektrische Gießkranwaage

1 Traverse, 2 Pfanne, 3 Meßfühler in der Hakenaufhängung

Als Kraftmeßdosen kommen vor allem Kraftmeßdosen mit Dehnungsmessstreifen (Abschnitt 6.1.) in Frage. Diese Meßdosen kommen Forderungen hinsichtlich Linearität, Hysterese, Temperaturempfindlichkeit, Einstellzeit u. a. am nächsten.

A 19. Worin unterscheidet sich eine Kraftmeßdose für Überlastkontrolle an einer Maschine von einer solchen für Wägezwecke?

Werden zur Signalverarbeitung besondere Anzeigekompensatoren verwendet, lassen sich Fehlerklassen von 0,1 ... 0,2 erreichen. Dieser Wert genügt jedoch den Anforderungen des ASMW (Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung) noch nicht, so daß die elektrischen Waagen nicht eichfähig sind und deshalb nur im innerbetrieblichen Verkehr eingesetzt werden dürfen /17/. Eine Übersicht der Eigenschaften wichtiger Waagen vermittelt Tafel 3.

Physikalisches Prinzip	Ausführungsbeispiele	auf Maximallast bezogene Fehlergrenze	Lastbereich in kg	Einstellzeit in s
Mechanische Waagen				
Waagen mit Einspiellage (Balkenwaagen, Laufgewichtswaagen)	Gleiswaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	10 ...	15 ... 60
	Plattformwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	300000	15 ... 60
	Bunkerwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	300000	15 ... 60
	Hängebahnwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	300000	15 ... 60
	Absackwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	300000	15 ... 60
	selb. Schüttwaage	$2 \cdot 10^{-2}$	—	15 ... 60
Neigungswaagen (mit Rundzeigerkopf oder Leuchtbild)	Gleiswaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	1 ...	2 ... 5
	Hängebahnwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	10000	2 ... 5
	Plattformwaagen	$6 \cdot 10^{-4}$	10000	2 ... 5
	Schnellwaage	$6 \cdot 10^{-4}$	10000	2 ... 5
	Sortierwaage	$6 \cdot 10^{-4}$	10000	2 ... 5
	Absackwaage	$6 \cdot 10^{-4}$	10000	2 ... 5
	Bandwaage	$2 \cdot 10^{-2}$	—	2 ... 5
	Dosierbandwaage	$2 \cdot 10^{-2}$	—	2 ... 5
Elektrische Waagen				
mit Meßstreifen-Meßdosen	Bunkerwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	1 ...	... 2
	Achsdrukwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Kranwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Muldenbankwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Seilzugwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Rollgangswaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Hängebahnwaagen	$2 \cdot 10^{-3}$	300000	... 2
	Bandwaagen	$2 \cdot 10^{-2}$	—	... 2
mit magnetoelastischen Meßdosen	Bunkerwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	50 ...	... 2
	Achsdrukwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Kranwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Muldenbankwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Seilzugwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Rollgangswaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Hängebahnwaagen	$1 \cdot 10^{-2}$	300000	... 2
	Bandwaagen	$2 \cdot 10^{-2}$	—	... 2

Tafel 3: Übersicht zu den Waagenbauarten

A 20. Welche Möglichkeiten bieten sich an, um das Signal für das Wäageergebnis von der Krankabine zur Meßzentrale zu übertragen?

8.2. Volumenmeßverfahren

Zur Volumenerfassung flüssiger und gasförmiger Stoffe werden Zähler eingesetzt, die in Rohrleitungen eingebaut sind. Während das Flüssigkeitsvolumen inkompressibel betrachtet werden kann, erfolgt die Messung des Gasvolumens im Betriebszustand. Es werden zusätzlich Druck- und Temperaturmeßgeräte angebracht, um eine Umrechnung auf den Normalzustand vornehmen zu können. Für trockene Gase gilt die Beziehung

$$V_o = V \frac{(b + p)}{p_o} \frac{\Theta_o}{\Theta} \quad (8.2)$$

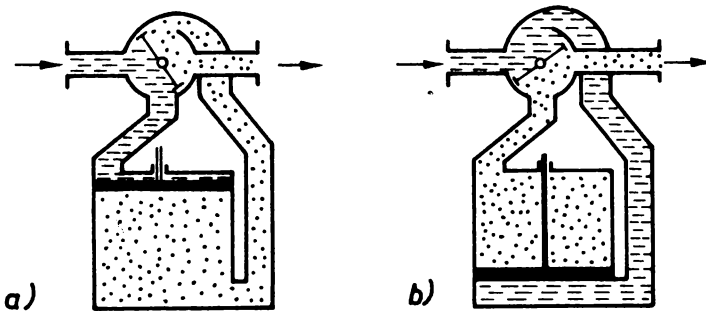


Bild 8.5: Einkolbenzähler

a) Abwärtsbewegung, b) Aufwärtsbewegung

Der **Einkolbenzähler** nach Bild 8.5 ist für die Messung dickflüssiger Stoffe geeignet. Er arbeitet nach dem Verdrängungsprinzip. Der Kolben wird durch die einströmende Flüssigkeit nach unten bewegt. Hat er die untere Stellung erreicht, erfolgt selbsttätig die Umsteuerung des Mehrwegventiles. Die weiterhin zuströmende Flüssigkeit bewegt den Kolben wieder nach oben, wobei gleichzeitig eine Entleerung des oberen Zylinderraumes erfolgt. Die Anzahl der Hübe ist somit ein Maß für die durchgeflossene Menge. Sie kann an einem Zähler abgelesen werden.

Für die Volumenmessung von Schmier- und Kraftstoffen wird vielfach der Ringkolbenzähler nach Bild 8.6 verwendet.

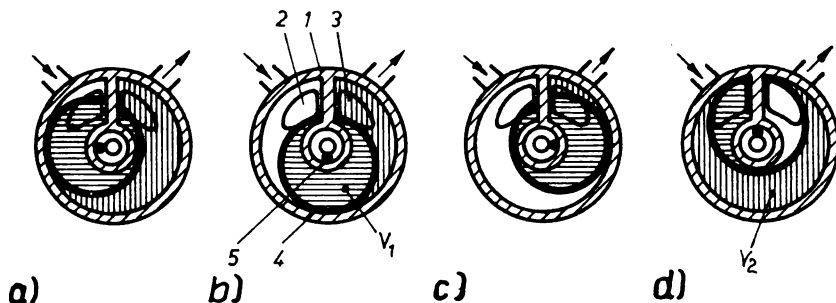


Bild 8.6: Ringkolbenzähler

a) bis d) Bewegungsablauf

1 Trennwand, 2 Einlassöffnung, 3 Auslassöffnung, 4 Ringkolben

Der kreisförmige Meßraum hat eine radial feststehende Trennwand sowie Ein- und Auslassöffnungen. Der Kolben ist als hohler Kreisingkörper ausgeführt. Er weist einen äußeren Führungsschlitz und in der Mitte einen Führungsstift auf. Letzterer wird im Gehäuse des Meßraumes exzentrisch geführt, so daß der Ringkolben nur eine oszillierende Bewegung ausführen kann. Er berührt gleichzeitig die Innenwand des Außenringes und die Außenwand des Innenringes ständig so, daß der Einlaß und der Auslaß nie direkt in Verbindung stehen können. In der Stellung b) ist der Füllprozeß des Innenraumes V_1 beendet, dagegen wurde der Außenraum rechts zur Hälfte entleert, der linke zur Hälfte gefüllt. In der Stellung c) ist die Entleerung des rechten Innenraumes in vollem Gang, der linke Teil wird weiter gefüllt. Der rechte Außenraum wurde beinahe entleert, während der linke Außenraum weiter aufgefüllt wird. Dieser Vorgang wiederholt sich zyklisch.

A 21. Welchen Einfluß hat das Spiel des Ringkolbens auf die Anzeige des Ringkolbenzählers?

Zur Messung von Gasvolumina in Niederdruck- und Hochdruckgasleitungen benutzt man Drehkolbenmesser (Bild 8.7). Die aktiven Teile sind zwei gleiche, sich drehende Kolben, die gegeneinander und gegen das Gehäuse dicht abschließen.

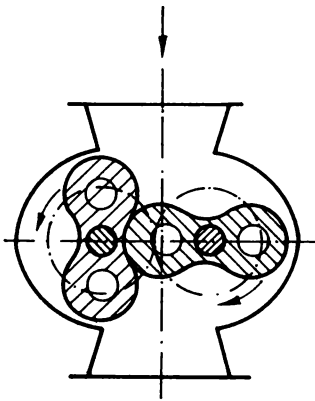


Bild 8.7: Drehkolbenzähler

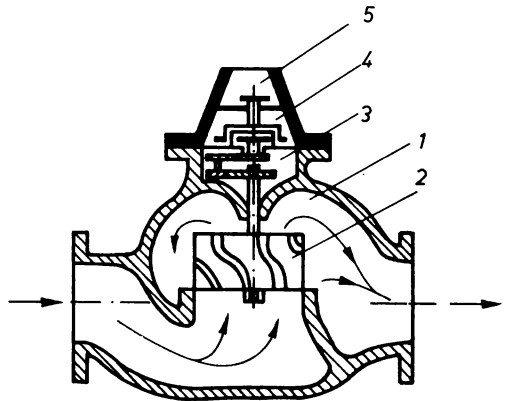


Bild 8.8: Woltman-Zähler

- | | |
|--------------|-------------------|
| 1 Druckraum, | 2 Turbinenrad, |
| 3 Getriebe, | 4 Magnetkupplung, |
| 5 Zeigerwerk | |

Um ein Verklemmen der Kolben zu vermeiden, sind sie außerhalb des Gehäuses durch ein Zahnradpaar gekoppelt. Bei einer vollen Umdrehung wird viermal das sichelförmige Volumen, das der Kolben mit der Gehäusewand einschließt, transportiert. Die Drehbewegung entsteht durch den Druckunterschied zwischen Eintritt und Austritt auf die beiden Drehkolben.

Der Turbinenzähler nach Bild 8.8, benannt nach dem Wasserbau-Ingenieur Woltman, hat als aktives Meßelement einen Propeller. Dieser stellt im Idealfall eine mathematische Schraubenfläche mit der Steigung h dar. Ein Stromfaden der Flüssigkeit legt ebenfalls den Weg h zurück, wenn der Propeller eine Umdrehung ausführt. Da der Querschnitt A konstant ist, wird das Teilvolumen $A \cdot h$ erfaßt. Ein Umlaufzähler nimmt die Integration $V = A \int dh$ vor. Durch den Anbau eines elektrischen Impulsgebers ist eine Fernzählung möglich.

A 22. Wie verhält sich der Turbinenzähler, wenn sehr kleine Mengen gemessen werden sollen?

Der Fehler der Zähler ist abhängig von der Belastung (Durchfluß) und von der Zähigkeit des strömenden Mediums. Die Fehlerklasse beträgt etwa 2.

Eine Übersicht der Eigenschaften wichtiger Zähler vermittelt Tafel 4.

Bezeichnung	Fehler- klasse	Leistungs- bereiche in m ³ /h	Bemerkungen
Auslaufzähler Kippmesser	... 2	... 0,1	Flüssig- keiten
Trommel- Flüssigkeitszähler	0,2 ... 1	0,003 ... 12	Flüssig- keiten
Verdrängungszähler Einkolbenzähler	0,5	0,4 ... 90	Flüssig- keiten
Ringkolbenzähler	0,5 ... 1	1,2 ... 18	Flüssig- keiten
Wälzkolbenzähler	0,5 ... 1	1,2 ... 70	Flüssig- keiten
Trockengaszähler	1	2,4 ... 100	Gase
Drehkolbengasmesser	2	20 ... 10 ⁵	Gase
Trommel-Gaszähler	0,1 ... 0,3	0,2 ... 2,0	Gase
Turbinenzähler Woltman-Zähler	2 ... 5	20 ... 200	Flüssig- keiten
Flügelradzähler	bis 2	5 ... 30	Flüssig- keiten

Tafel 4: Übersicht zu den Volumenmessern

8.3. Durchflußmeßverfahren

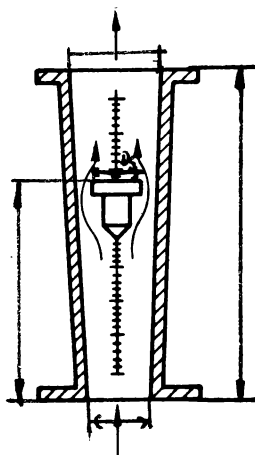


Bild 8.9: Schwebekegel-Durchflußmesser

Der **Schwebekegeldurchflußmesser** nach Bild 8.9 ist zur Messung von Flüssigkeiten und Gasen geeignet. Er ist in einen senkrechten Zweig der Rohrleitung einzubauen. Der Schwebekörper, an dem sich die Schwerkraft, die Auftriebskraft und die Reibungskraft (Strömungsreibung) das Gleichgewicht halten, befindet sich in einem etwas konisch erweiterten Rohr. Er verändert je nach der Größe des Durchflusses seine Höhenlage. Die Stellung kann man visuell beobachten, wenn die Rohrwand durchsichtig ist. Mechanische oder elektrische Abgriffe sind möglich.

Der **induktive Durchflußmesser** nach Bild 8.10 ist für die Messung von Flüssigkeiten geeignet, die eine gewisse elektrische Leitfähigkeit ($\kappa > 10^{-5} \text{ S/cm}$) haben. Diese Bedingung erfüllt schon Leitungswasser, sie gilt nicht für Schmieröle.

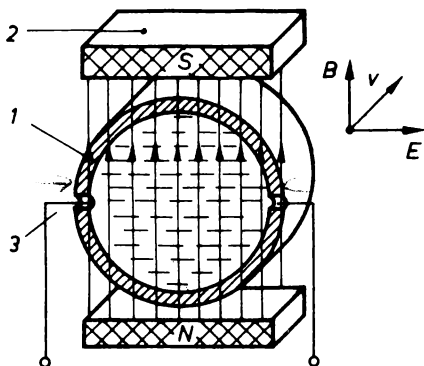


Bild 8.10: Induktiver Durchflußmesser

1 unmagnetische Leitung, 2 Permanentmagnet, 3 Elektroden

Das Meßprinzip beruht auf der Anwendung des Induktionsgesetzes. Wird die **Flüssigkeit** (elektrischer Leiter) mit der Geschwindigkeit v senkrecht zur Richtung eines homogenen Magnetfeldes mit der Flußdichte B bewegt, entsteht eine **Urspannung** E :

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (8.3)$$

Somit ist die Spannung ein Maß für die Geschwindigkeit c und bei konstantem Querschnitt A ein Maß für den Durchfluß Q . Ein konstantes Magnetfeld (Erregung durch Gleichstrom) kann unerwünschte Polarisationserscheinungen an den Elektroden hervorrufen. Diese lassen sich vermeiden, wenn die Magnetspulen durch einen Wechselstrom erregt werden. Die Meßspannung ist dann ebenfalls eine Wechselspannung.

Beispiel:

Wie groß ist die Urspannung am induktiven Durchflußmesser, wenn die magnetische Flußdichte $0,1 \text{ T}$, der lichte Rohrdurchmesser 1 m und die Strömungsgeschwindigkeit 2 m/s betragen?

Lösung:

Mit GL (8.3)

$$E = 0,1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\underline{\underline{E = 0,2 \text{ V} = 200 \text{ mV}}}$$

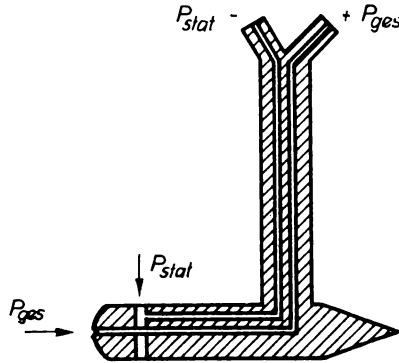


Bild 8.11: Staurohr nach Prandtl

Mit Hilfe des Staurohres nach Prandtl (Bild 8.11) kann man die Geschwindigkeit eines Stromfadens messen. Kennt man die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt einer Rohrleitung oder eines Gerinnes, läßt sich bei bekannter Fläche der Durchfluß berechnen. Im Prinzip ist es gleichgültig, ob es sich um eine Messung in Flüssigkeit oder in Gasen handelt.

In einer Strömung setzt sich nach dem Gesetz von Bernoulli der Gesamtdruck aus der Summe von statischem und dynamischem Druck zusammen

$$P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}} = P_{\text{ges}} \quad (8.4)$$

Lassen sich der Gesamtdruck und der statische Druck messen, erhält man aus der Differenz den dynamischen Druck, auch Staudruck genannt.

Aus der bekannten Beziehung $p_{\text{dyn}} = \frac{v^2 \rho}{2}$ ergibt sich die gesuchte Stromfadengeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 (P_{\text{ges}} - P_{\text{stat}})}{\rho}} \quad (8.5)$$

Das Staurohr hat zwei Bohrungskanäle. Die Bohrung an der Mündung ist gegen die Strömung gerichtet und erfährt den Gesamtdruck. Die andere Bohrung (meist ein Ringspalt) ist senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet und dient zur Messung des statischen Druckes. Zur Druckmessung dienen Differenz-Manometer. Das Einsatzgebiet des Staurohres ist vorwiegend die Betriebsuntersuchung.

A 23. Ein Staurohr wird nicht genau gegen die Strömung gerichtet. Wie wirkt sich dieser Einbaufehler auf die Anzeige aus?

Beispiel:

Wie groß ist der zu erwartende Staudruck, wenn das Prandtl-Rohr in eine Wasserleitung mit $v = 0,5 \text{ m/s}$, $\vartheta = 4^\circ \text{C}$ eingebaut wird?

Lösung:

Gl. (8.4) wird nach $p_{\text{ges}} - p_{\text{stat}} = p_{\text{dyn}}$ aufgelöst.

Mit $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ erhält man

$$p_{\text{dyn}} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5^2 \text{ (m/s)}^2}{2} = \underline{\underline{125 \text{ Pa}}}.$$

Die Normblende (Wirkdruckgeber) wird als Meßfühler für den Durchfluß in geschlossenen Rohrströmungen angewendet. Das Meßprinzip beruht auf der Veränderung des dynamischen Druckes eines durch eine Verengung strömenden Mediums (Bild 8.12).

Nach dem Gesetz von Bernoulli nimmt dabei der statische Druck ab. Mißt man die Differenz $p_1 - p_2$ des statischen Druckes vor und kurz nach der Einschnürung, kann man die Strömungsgeschwindigkeit, also auch den Durchfluß, bestimmen. Mit der Zusammenfassung aller geometrischen und strömungstechnischen Einflüsse in einem Faktor ergibt sich der Durchfluß für einen vorgegebenen Zustand:

$$\begin{aligned} Q_v &= K_v \sqrt{p_1 - p_2} \\ Q_m &= K_m \sqrt{p_1 - p_2} \end{aligned} \quad (8.6)$$

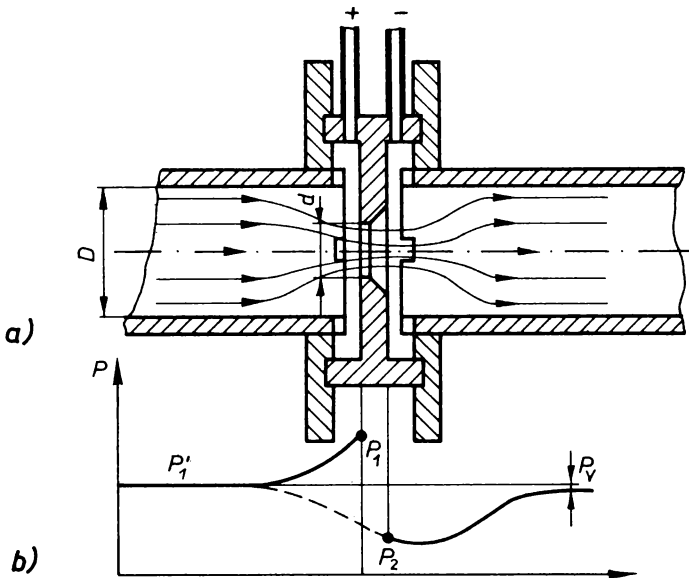


Bild 8.12: Normblende

a) Aufbau und Strömungsbild, b) Druckverlauf

D Rohrrinnendurchmesser, d Blendendurchmesser, $p_1 - p_2$ Wirkdruck, p_1 Druck in der Leitung, p_v bleibender Druckverlust

Die notwendige Verengung in der Rohrleitung erreicht man durch den Einbau eines Wirkdruckgebers. In TGL 0—1952 sind die Berechnungsgrundlagen festgelegt. Man unterscheidet die Normblende, die Normdüse und die Normventuridüse. Die Normblende zeichnet sich durch eine einfache Formgebung und damit einfache Fertigung aus. Sie hat in der Praxis die größte Verbreitung gefunden.

Die Einlaufkante der Blende ist sorgfältig auszuführen (scharf und gratfrei), Schmutzablagerungen im Betrieb führen zu Meßfehlern. Für größere Rohrleitungen ist die Blendenausführung besonders einfach. Sie besteht nur noch aus einer Blechscheibe, die sich leicht zwischen zwei geeignete Rohrflanschen schieben läßt.

Auf die Berechnung der Konstanten in Gl. (8.5) soll hier nicht eingegangen werden. Hinweise sind dem Fachschrifttum /2/, /5/, /13/ zu entnehmen. Bei der Auswahl des Anzeigegerätes ist zu beachten, daß zwecks Linearisierung eine Radizierung notwendig ist. Solche spezielle Differenzdruckmeßgeräte werden als **Wirkdruckmesser** bezeichnet.

Beispiel:

Von einer Normblende ist die Eichkonstante mit $K_v = 70 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\sqrt{\text{Pa}}}$ gegeben.

Wie groß ist der Volumendurchfluß bei einem Wirkdruck von 3600 Pa?

Lösung:

Mit Gl (8.6)

$$Q_v = 70 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\sqrt{\text{Pa}}} \sqrt{3600 \text{ Pa}}$$

$$\underline{\underline{Q_v = 4200 \text{ m}^3/\text{h}}}$$

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Masse von Fest- und Schüttgütern dienen Waagen. Bevorzugt werden solche Typen, die eine Fernbedienung oder einen selbsttätigen Betrieb zulassen.

Das Volumen flüssiger und gasförmiger Körper wird mit Hilfe von Zählern bestimmt. Für Flüssigkeiten hat der Ringkolbenzähler und für Gase der Drehkolbenzähler besondere Bedeutung.

Zur Messung des Durchflusses leitfähiger Flüssigkeiten ist der induktive Durchflußmesser geeignet. Weit verbreitet ist die Normblende. Die Anzeige ist nichtlinear, da die Wurzel aus dem Differenzdruck proportional zum Durchfluß ist.

Übungen

- 8.1. Welche besonderen Vorteile besitzt die elektrische Waage gegenüber der mechanischen Waage?
- 8.2. Welche Anforderungen stellt das ASME an den Fehler für eichfähige Waagen?
- 8.3. Welche Zählerausführungen sind für die Volumenmessung von Flüssigkeiten und welche für Gase geeignet?
- 8.4. Beschreiben Sie den Vorgang in Stellung a in Bild 8.5 für den Ringkolbenzähler!
- 8.5. Nach welchem Prinzip arbeitet die Meßblende?
- 8.6. Welche Manometer eignen sich als Wirkdruckmesser?
- 8.7. Zeichnen Sie die statische Kennlinie $Q = f(p_1 - p_2)$ für die Meßblende im Beispiel auf Seite 58, wenn der maximale Wirkdruck 6400 Pa beträgt!

Lösungen der Aufgaben und Übungen

A 1. Für örtliche Anzeige: biegsame Welle oder Hebel; für Fernübertragung: elektrische Leitung, pneumatische Rohrleitungen oder Schlauchverbindungen.

A 2. Bei den mechanischen Zählern sind die beweglichen Teile mit Masse behaftet. Somit bedeutet eine große Zählfrequenz hohe Beschleunigung und starker Verschleiß.

A 3. Nach dem Maschensatz gilt mit Bild 2.4.

$$I(R_i + R_L + R_v) + U = E; \quad \text{mit } I = U/R_g \quad \text{und } E = K \cdot n$$

$$\frac{U}{R_g} (R_i + R_L + R_v) + U = K \cdot n$$

$$n = \frac{U}{K} \left(1 + \frac{R_i + R_L + R_v}{R_g} \right)$$

A 4. Es entstehen falsche Ziffern. Ist der Abstand zu groß, erscheinen die 0, 1 oder 2, bei Überlappung die 5 oder 6.

A 5. Schleifdrahtverfahren; Verfahren mit Berührung.

A 6. Es ist eine mechanische Zahnrad- oder Reibradübersetzung mit 2 : 1 zwischenschalten.

A 7. Es sind elektromechanische, fotoelektrische und pneumatische Abgriffsysteme geeignet.

A 8. Gummi, Weichplaste und Werkstoffe mit hochglänzenden Oberflächen.

A 9. Maßgebend sind die Vergrößerung der Optik und die Entfernung zum Meßgegenstand.

A 10. Temperatur des Meßgegenstandes, Genauigkeit der Grob- und Feinteilung;
kleinste Länge: Feinteilung + Y, größte Länge: Feinteilung + Y + Grobteilung.

A 11. Bei großer Schwimmermasse kann der Einfluß der Zugkraft auf die Veränderung der Tauchtiefe vernachlässigt werden.

A 12. Die Kondensatmenge in der Vergleichsleitung und die Einbauhöhe des Meßgerätes haben keinen Einfluß auf die Anzeige.

A 13. Durch Ersatz der mechanischen Feinmeßuhr mit einem induktiven Geber.

A 14. Der Flüssigkeitsdruck wird mittels Kapillarleitung auf das Anzeigemanometer übertragen. Die Leitungslänge kann nur wenige Meter betragen.

A 15. Die Meßbrücke wirkt wie ein doppelter Spannungsteiler, der linke Zweig besitzt ein festes Teilverhältnis. Im rechten Zweig erfolgt eine Verschiebung entsprechend der Induktivitätsänderung.

A 16. Verschiedene Querschnitte bewirken einen unterschiedlichen Ausschlag der Menisken. Der Gesamtausschlag bleibt jedoch unverändert.

A 17. Es ergibt sich eine Verschiebung des Nullpunktes der Anzeige.

A 18. Die Dichte der Sperrflüssigkeit hat keinen Einfluß auf die Anzeige.

A 19. Für Kraftmeßdosen zur Überlastkontrolle ist ein größerer Grundfehler ausreichend. An die Linearität werden keine besonderen Anforderungen gestellt.

A 20. Übertragung mittels Schleifleitung, Induktionsschleife oder auf drahtlosem Wege.

A 21. Der entstehende Leckstrom verursacht eine zu kleine Anzeige.

- A 22. Der Zähler wird eventuell nicht anlaufen oder einen großen Fehler aufweisen.
 A 23. Der erfaßte Differenzdruck ist kleiner als der richtige Wert.
 Ü 2.1. Mechanische Klappe, Lichtschranke, pneumatische Fangdüse.
 Ü 2.2. Zugmagnet, Klinke, Klinkenrad, Ziffernräder; Schaltkontakt, fotoelektrische und induktive Meßwandler.
 Ü 2.3. Handtachometer, Wechselstromtachometer, elektronische und pneumatische Drehzahlmesser.
 Ü 2.4. Periodendauer der Messung, Umlauffrequenz, Anzahl der Impulse pro Umlauf.
 Ü 2.5. Gl. (2.2) nach U aufgelöst ergibt

$$U_1 = \frac{1000 \text{ U/min} \cdot 0,05 \text{ V/min}^{-1}}{1 + \frac{(5 + 10 + 40,5) \Omega}{500 \Omega}}$$

$$U_1 = 45 \text{ V}$$

Der verfälschte Wert ist $U_2 = 44,6 \text{ V}$.

Absoluter Fehler der Spannung $F_U = -0,4 \text{ V}$,

absoluter Fehler der Drehzahlanzeige

$$F_n = \frac{n \text{ Bereich}}{U \text{ Bereich}} \cdot F_U = \frac{1000 \text{ U/min}}{45 \text{ V}} (-0,4 \text{ V})$$

$$\underline{\underline{F_n = -8,9 \text{ U/min}}}$$

Ü 3.1. Zahnstange, Seiltrommel.

Ü 3.2. $99 \cdot 99 = 9801$

Ü 3.3. Teilungsschritt = $\frac{270^\circ}{512} = 0,528^\circ$

$$\underline{\underline{x = 31,5'}}$$

- Ü 4.1. Das Prinzip besteht im Vergleich der Sekundärspannungen zweier Transformatoren, deren Eigenschaften durch Meßgegenstand und Vergleichsgegenstand beeinflusst werden. Am Band haftende Schmiermittel haben keinen Einfluß auf die Anzeige.
 Ü 4.2. Jeder Strahler hat einen günstigen Anwendungsbereich. Dieser entspricht etwa der Halbwertsdicke.
 Ü 4.3. Eine zusätzliche Blende hält die infrarote Strahlung der Lichtquelle zurück, so daß diese Strahlung den Helligkeitsvergleich nicht beeinflussen kann.
 Ü 4.4. Es ergeben sich Meßfehler durch Schlupf, Verschleiß und Streckung des Meßgegenstandes.
 Ü 5.1. Um mathematisch lineare Beziehungen $V = f(h)$ zu erhalten, wird die stehende prismatische oder zylindrische Form empfohlen.

Ü 5.2. Steigt das Füllgut allmählich an, kommt es zur Verschiebung des Dielektrikums eines Zweistoffkondensators und somit zur Kapazitätsveränderung.

Ü 5.3. In verschiedenen Höhen werden Strahlenschränken angebracht. Die zugehörigen Zählrohre liefern bei Niveauänderungen ein O/L-Signal.

Ü 5.4. Hydrostatische Standmessung.

Ü 5.5. Mit Gl. (5.4) ist die Kapazitätsänderung

$$\Delta C = 20 \text{ pF} \left(\frac{2,2 \cdot \epsilon_o}{\epsilon_o} - 1 \right) \frac{1 \text{ m}}{2 \text{ m}}$$

$$\Delta C = 12 \text{ pF}$$

Die Gesamtkapazität $C = C_o + \Delta C$

$$\underline{\underline{C = 32 \text{ pF}}}$$

Ü 6.1. Für die örtliche Anzeige sind die mechanischen und hydraulischen Meßverfahren geeignet.

Ü 6.2. Eine Kraftmeßdose ist eine massive Zusammenschaltung eines meist zylindrischen Federkörpers mit einem elektrischen Meßwandler.

Ü 6.3. Bei zylindrischen Kraftmeßdosen hat die Krafteinleitung zentrisch zu erfolgen. Als Zwischenstück findet meist eine Kalotte Verwendung.

Ü 6.4. a) Erforderliche Fläche

$$A_{\text{erf}} = \frac{F}{\sigma_{zul}} = \frac{0,6 \cdot \text{MN}}{280 \text{ MPa}} = 0,00214 \text{ m}^2$$

Innendurchmesser des Kreisringquerschnittes

$$d_i = \sqrt{d_a^2 - \frac{4}{\pi} A_{\text{erf}}} = \underline{\underline{60,7 \text{ mm}}}$$

b) Gl. (6.2) umgestellt:

$$l = A_{\text{erf}} \cdot \frac{E}{F} \cdot \Delta l = \frac{205 \cdot \text{GPa}}{280 \text{ MPa}} \cdot 0,1 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{l = 73,3 \text{ mm}}}$$

Ü 6.5. Durch die ferromagnetischen Eigenschaften verlagern sich bei Belastung die magnetischen Kraftlinien und bewirken die Induktion unterschiedlicher Spannungen in den Windungen 5 und 6. Die Spannungsdifferenz ist ein Maß für die Belastung.

Ü 7.1. U-Rohr-Manometer, Schwimmermanometer, Schrägrohrmanometer.

Ü 7.2. Die Sperrflüssigkeit kann einfrieren.

Ü 7.3. Gl. (7.1) nach h umgestellt, wobei Δp als konstant angenommen wird.

Richtig: $h_1 = \frac{\Delta p}{\rho_1 \cdot g}$

Falsch: $h_2 = \frac{\Delta p}{\rho_2 \cdot g}$

absoluter Fehler: $F = \frac{\Delta p}{g} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right)$

relativer Fehler: $F_{\text{rel}} = \frac{\frac{\Delta p}{g} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right)}{\frac{\Delta p}{g} \cdot \frac{1}{\rho_1}} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} = 0,0079$

$F_{\text{rel}} = 0,79 \%$

Ü 7.4. Durch Verlegung einer genügend langen Meßleitung und Zwischenschaltung einer Wasserschleife.

Ü 8.1. Kleine Abmessungen, Robustheit, einfache Signalübertragung.

Ü 8.2. Für eichpflichtige Waagen müssen nach der Eichvorschrift des ASMW bestimmte Eichfehlergrenzen eingehalten werden.

Ü 8.3. Für Flüssigkeiten: Einkolben-, Ringkolben- und Woltman-Zähler;
für Gase: Drehkolbenzähler.

Ü 8.4. Der rechte Teil des Innenraumes wurde beinahe entleert, während die Auffüllung des linken Teiles kurz vor der Vollendung steht. Gleichzeitig beginnt die Entleerung des rechten Teiles des Außenraumes, während der linke aufgefüllt wird.

Ü 8.5. Durch eine Einschnürung der Strömung in einer Leitung wird eine Veränderung des statischen Druckes verursacht, die mit Hilfe eines Wirkdruckmeßgerätes erfaßt wird.

Ü 8.6. U-Rohr-Manometer, Schrägrohr-Manometer, Schwimmer-Manometer und die Ringwaage (vgl. Tafel 2).

Ü 8.7. Mit Hilfe von Gl. (8.6) wird die Wertetafel berechnet.

$\frac{Q_v}{\text{m}^3/\text{h}}$	$\frac{\Delta p}{\text{Pa}}$
0	0
1400	400
2100	900
2800	1600
3500	2500
4200	3600
4900	4900
5600	6400

Zeichenmaßstäbe:

für die Ordinate 1 cm $\hat{=}$ 1000 m³/h

für die Abszisse 1 cm $\hat{=}$ 1000 Pa

Die Kurve wurde nicht gezeichnet.

Literaturverzeichnis

- / 1 / Autorenkollektiv: Fachwissen des Ingenieurs, Bd. 2,
Grundlagen der Automatisierung, 4. Auflage.
Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1971
- / 2 / Faltin, H.: Meßgeräte und Meßverfahren der Kraft- und
Wärmewirtschaft.
Halle: VEB W. Knapp Verlag 1955
- / 3 / Kautsch, R.: Elektrische Meßtechnik zur Messung
nichtelektrischer Größen.
Berlin: VEB Verlag Technik 1966
- / 4 / Kulakow, M. W.: Geräte und Verfahren der Betriebsmeßtechnik.
Berlin: VEB Verlag Technik 1969
- / 5 / Hofmann, W.,
Gatzmanga, H.: Einführung in die Betriebsmeßtechnik.
Berlin: VEB Verlag Technik 1972
- / 6 / Kautsch, R.: Elektrische Meßverfahren für nicht-
elektrische Größen.
RA 131), 1971
- / 7 / Schroedter, M.: Standmessung in Behältern.
RA 31, 1965
- / 8 / Roeber, R.: Meßeinrichtung für die automatische
Überwachung, Regelung und Steuerung.
RA 34, 1965
- / 9 / Jeschke, G.: Kleines Lexikon der Betriebsmeßtechnik.
RA 54, 1967
- /10/ Gensel, J.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren.
RA 65, 1968
- /11/ Dutschke, H.,
Greibenstein, K.: BMSR-Einrichtungen in explosionsgefährdeten
Betriebsstätten.
RA 71, 1968
- /12/ Finger, H.: Elektrische Wägetechnik.
RA 23, 1964
- /13/ Meyer, J.: Volumen- und Durchflußmessung von
Flüssigkeiten und Gasen.
RA 32, 1965
- /14/ Schlayer, W.: Fertigungsmeßtechnik (Kurzfassung)
Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium
Katalog-Nr. 141.03—01
Institut für Fachschulwesen der DDR
Karl-Marx-Stadt

1) RA . . . Reihe Automatisierungstechnik, Berlin, Verlag Technik

- /15/ Richter, W.: Grundlagen für Systeme zur Informationsgewinnung
Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium
Katalog-Nr. 03 1005 01 0
Institut für Fachschulwesen der DDR.
Karl-Marx-Stadt 1979.
- /16/ Hoschke, G.: Systeme zur Messung elektrischer Größen.
Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium.
Katalog-Nr. 03 1677 01 0
Institut für Fachschulwesen der DDR
Karl-Marx-Stadt 1977.
- /17/ Götte, K.; Hart, H.; Taschenbuch Betriebsmeßtechnik, Berlin:
Jeschke, G.: VEB Verlag Technik 1974.
- /18/ Bröckhaus abc Automatisierung.
Leipzig: VEB F. A. Brockhaus Verlag 1975.

Sachwortverzeichnis

	Seite
Bandwaage	46
Behälterstand	23
Bodendruckmessung	25
Breitenmeßverfahren	18
Brückenwaage	45
Dehnungsmeißstreifen	32
Dickenmeßgerät	14
— , mechanische	14
— , mit radioaktiven Isotopen	16
Differentialtransformator	9
Differenzdruck-Manometer	56
Drehkolbenzähler	51
Drehmelder	13
Drehmomentenmeßverfahren	35
— , magnetoelastisches	35
— , mit Dehnungsmeißstreifen	36
Drehzahlmesser	2
— , elektronische	6
— , mechanische	2
— , pneumatische	2
Durchflußmeßverfahren	53
Einkolbenzähler	50
Elektromechanische Zähler	1
elektrische Standmessung	26
— Waage	48
elektronischer Drehzahlmesser	6
— Zähler	2
Federkörper	31
Federmanometer	43
Flüssigkeitsmanometer	38
fotoelektrischer Wandler	6

	Seite
Fotoempfänger	20
Gammastrahlen	28
geometrische Abmessungen	14
Glasfaseroptik	18
Gleichstrom-Tachogenerator	4
hydraulische Kraftmeßgeber	30
hydrostatische Standmessung	24
induktiver Durchflußmesser	54
induktive Kraftmeßdose	31
Kapazitätsmeßbrücke	26
Kraftmeßdosen	30
– , hydraulische	30
– , induktive	31
– , magnetoelastische	34
– , mit Dehnungsmeßstreifen	32
Längenmeßverfahren	20
– mit drei Fotozellen	20
– mit Grob-Fein-Maßstab	22
Leuchtbildanzeige	46
magnetische Dickenmeßgeräte	15
magnetoelastische Drehmomentenmaßverfahren	35
– Kraftmeßverfahren	34
mechanischer Zähler	1
Messung von	
– Behälterstand	23
– Breite	18
– Dicke	14
– Drehmoment	35
– Drehzahl	2
– Druck	38

	Seite
– Kraft	29
– Länge	20
– Menge	45
– Stückzahl	1
– Wege	8
– Winkel	11
Neigungswaage	46
Normblende	56
optische Anzeige	46
optisches Breitenmeßgerät	19
Plattenfedermanometer	43
pneumatischer Drehzahlgeber	6
– Zähler	2
radioaktive Isotope	16
Radizierung	57
Ringkammer	42
Ringkolbenzähler	51
Ringwaage	41
Röhrenfedermanometer	43
Rückstellmoment	42
Schwebekegel-Durchflußmesser	54
Schwimmermanometer	40
Spannungsteiler	8
Standmessung	23
– elektrische	26
– hydrostatische	24
– mit Radionukliden	27
– mittels Schwimmer	23
Staurohr nach Prandtl	55
Tachogenerator	4
Turbinenzähler	52

	Seite
Umsetzerscheibe	12
U-Rohr-Manometer	38
Volumenmeßverfahren	50
Wägeverfahren	45
Wandler, fotoelektrischer	6
Wechselspannungs-Tachogenerator	6
Wegmeßverfahren	8
Wirkdruckgeber	56
Wirkdruckmesser	57
Widerstandsferngeber	12, 20
Winkelmeßverfahren	11
Wirbelstrom-Drehzahlmesser	3
Zähler	1
– , elektromechanische	1
– , elektronische	2
– , mechanische	1
– , pneumatische	2

FACHSCHUL-
FERNSTUDIUM

Dipl.-Ing. Erwin Krüger
Prof. Dr.-Ing. sc. techn. Werner Richter

M E S S – S Y S T E M E

0.40

**Systeme zur Messung von
Stoffeigenschaften**

**Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen der
Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt**

03 1677 04 0

Verfasser:

Dipl.-Ing. Erwin Krüger
Ingenieurschule für Bergbautechnik und Energetik Senftenberg
(Abschnitte 2 und 3)

Prof. Dr.-Ing. sc. techn. Werner Richter
Technische Hochschule Leipzig
(Abschnitte 1 und 4 – 11)

Gesamtredaktion:

Prof. Dr.-Ing. sc. techn. Werner Richter
Technische Hochschule Leipzig

Lektoren:

Dr. Herbert Kathe
Ingenieurhochschule Köthen

Dipl.-Chem. Joachim Teschner
Institut für Fachschulwesen Karl-Marx-Stadt

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Günter Helm
Institut für Fachschulwesen Karl-Marx-Stadt

Redaktionsschluß: 20. 7. 1978

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Literaturverzeichnis	
Verzeichnis der Kurzzeichen	
1. Einleitung	1
2. Feuchtemessung	4
2.1. Grundlagen	5
2.2. Luft- und Gasfeuchte-meßtechnik	9
2.3. Feststofffeuchte-meßtechnik	14
2.4. Zusammenfassung	18
3. Bestimmung der Verbrennungswärme und des Heizwertes fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe	19
3.1. Begriffserläuterung	19
3.2. Bestimmungsverfahren	20
3.3. Zusammenfassung	22
4. Dichtemessung	22
4.1. Flüssigkeitsdichte	23
4.2. Gasdichte	25
4.3. Zusammenfassung	26
5. pH-Wert-Messung	27
6. Messung der Leitfähigkeit	29
7. Messung optischer Eigenschaften	31
8. Messung magnetischer Eigenschaften	33
9. Messung der Wärmeleitfähigkeit	35
10. Messung der Adsorptionsgeschwindigkeit	37
11. Messung der Viskosität	40
12. Zusammenfassung zu den Abschnitten 5. bis 11.	44
Lösungen der Aufgaben	45
Tafel 1: Übersicht über Verfahren zur Messung von Stoffeigenschaften	47

Verzeichnis der Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung
A	cm^2	Fläche
C		Curiesche Konstante
C	F	Kapazität
c_{H^+}		Wasserstoffionenkonzentration
E	V	Urspannung
G	S	Leitwert
Ho	MJ/kg für feste und flüssige Brennstoffe	Spezifischer Brennwert (oberer Heizwert) (Verbrennungswärme)
Hu	MJ/m ³ für Brenngas bezogen auf den Normzustand	Spezifischer Heizwert (unterer Heizwert) (Heizwert)
k		Konstante, allgemein
K_n	mV	Nernstkonstante
l	m	Länge, Abstand
M	Nm	Drehmoment
m	kg	Masse
p	Pa	Druck
p_f	Pa	Wasserdampfsättigungsdruck
p_G	Pa	Druck des trockenen Gases
p_W	Pa	Wasserdampfpartialdruck
pH		pH-Wert
R	$\frac{\text{J}}{\text{g K}}$	spezielle Gaskonstante
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_o	$\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$	molare Gaskonstante (allgemeine Gaskonstante)
s	m	Abstand
T	K	Temperatur
t	°C	Celsius-Temperatur
V	m ³	Volumen, Gasvolumen
v	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	spezifisches Gasvolumen
v_o	l mol^{-1}	molares Volumen (Molvolumen)
Ww	J K^{-1}	Wasserwert

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung
x	$\frac{\text{g}}{\text{kg}}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	Feuchtegrad
Δp	Pa	Druckdifferenz
ϵ_0	F m^{-1}	absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums ($\approx$ der Luft)
ϵ_r		relative Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_{r \text{ res}}$		resultierende relative Dielektrizitätskonstante
η	N s m^{-2}	dynamische Viskosität
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
κ	S m^{-1}	elektrische Leitfähigkeit
κ		Suszeptibilität
λ	m	Wellenlänge
μ_{rel}		relative Permeabilität
ν	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	kinematische Viskosität
ρ	kg m^{-3}	Dichte
ρ	$\Omega \text{ m}$	spezifischer Widerstand
τ	N m^{-2}	Schubspannung
τ	$^{\circ}\text{C}$	Taupunkttemperatur
Φ	kg m^{-3}	absolute Feuchte
φ		relative Feuchte
χ	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	spezifische Suszeptibilität
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit

Literaturverzeichnis

- / 1 / Höhna, H.: Systeme zur Messung thermischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 295.23—03. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1977.
- / 2 / Hofmann, W.: Systeme zur Messung mechanischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 295.23—02. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1977.
- / 3 / Richter, W.: Grundlagen für Systeme zur Informationsgewinnung. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 105.28—01. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1972.
- / 4 / Lessig, E.: Elektrische und elektronische Verstärker. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 296.13—03. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1973.
- / 5 / Hoshke, G.: Systeme zur Messung elektrischer Größen. Lehrbrief für das Fachschul-Fernstudium. Katalog-Nr. 295.23—01. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR 1977.
- / 6 / Autorenkollektiv: Taschenbuch Betriebsmeßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1974.
- / 7 / Hart, H.: Einführung in die Meßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
- / 8 / Tölle, H.: Meßverfahren für wärme- und maschinentechnische Untersuchungen. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1968.
- / 9 / Borgwardt: Gasanalysen — Meßtechnik. RA 23¹⁾
- / 10 / Borgwardt: Flüssigkeitsanalysen — Meßtechnik. RA 26
- / 11 / Götte: Feuchtemeßtechnik. RA 48

1) RA . . . : Reihe Automatisierungstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin.

1. Einleitung

Die chemische Industrie nimmt in der Volkswirtschaft der DDR eine wesentliche Position ein. Sie ist sowohl Lieferant von Grund- und Hilfsstoffen als auch einer breiten Palette von Fertigprodukten für die gesellschaftliche und individuelle Konsumtion; sie weist die höchste Arbeitsproduktivität von allen Industriezweigen aus und liegt, gemessen am Anteil der Warenproduktion, an dritter Stelle in der DDR.

Entsprechend der Vielfalt der Rohstoffe, Halbfabrikate und Finalerzeugnisse und der Herstellungsverfahren sind in der chemischen Industrie, der Nahrungsgüterwirtschaft, der Metallurgie, der Energiewirtschaft und in anderen Industriezweigen viele Stoffeigenschaften zu messen, die sich in ihrer Art und in ihrer Wechselwirkung mit der Umwelt wesentlich unterscheiden.

Man kann gegenwärtig annehmen, daß von je 100 Meßgrößen in der chemischen Verfahrenstechnik etwa

- 45 Temperaturen,
- 20 Drücke (oder Differenzdrücke),
- 20 Mengen und Durchflüsse,
- 5 Füllstände und
- 10 Analysenwerte

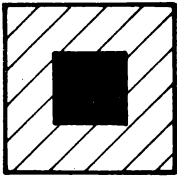
sind. Die vier erstgenannten Größen sind Bilanz- und Zustandsgrößen. Ihre meßtechnische Bestimmung wird in den Lehrmaterial-Bausteinen /1/ und /2/ erläutert. Die Analysenwerte enthalten Aussagen über Stoffeigenschaften der in den verfahrenstechnischen Prozeß eingesetzten oder in ihm wirkenden Stoffen.¹⁾ Mit deren Ermittlung beschäftigt sich der vorliegende Lehrmaterial-Baustein.

Als Analyse wird die Bestimmung der Bestandteile eines Gemischs fester Stoffe, einer Suspension, Emulsion, Legierung oder einer chemischen Verbindung bezeichnet.

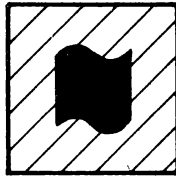
Die Vielfalt der Stoffeigenschaften bedingt eine Vielzahl von Meßverfahren, um sie zu erfassen; hinzu kommt die Tatsache, daß die zu analysierenden reinen Stoffe und Gemische unter den verschiedensten Bedingungen (Temperaturen, Drücke, Aggregatzustände) vorliegen können.

Bereits eine Einteilung der Gemische nach der Art der Aggregatzustände ergibt neun Kombinationen, wie Bild 1.1 zeigt; dabei sind nur jeweils zwei Aggregatzustände miteinander kombiniert.

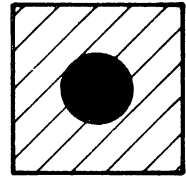
1) Im Lehrmaterial-Baustein „Grundlagen für Systeme zur Informationsgewinnung“ /3/ wurde gezeigt, daß Meßeinrichtungen primär zur Informationsgewinnung am Prozeß dienen; daß der Informationsaspekt, der bei der Messung dominiert, aber nicht von anderen Aspekten losgelöst betrachtet werden kann, wird bei der Messung von Stoffeigenschaften besonders deutlich.



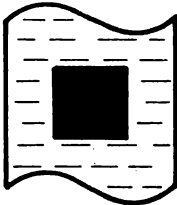
Legierungen



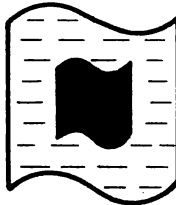
*Wassergehalt
fester Stoffe*



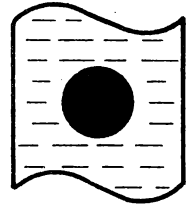
*z.B. Wasserstoff
in Stahl*



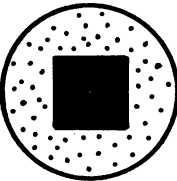
Suspensionen



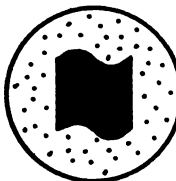
wäßr. Lösungen



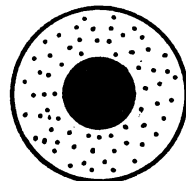
Gas in Wasser



*Staubgehalt
in Gasen*



Nebel



*Gasgemische,
Luftfeuchtigkeit*



fest



flüssig



gasförmig

Bild 1.1: Kombinationsmöglichkeiten der Aggregatzustände

A 1. Nennen Sie andere Kombinationen aus Bild 1.1 und geben Sie als Beispiele Industriezweige an, in denen diese Kombinationen von Bedeutung sind!

Zur Messung von Stoffeigenschaften können drei Arten von Verfahren unterschieden werden:

chemische Verfahren,
physikalisch-chemische Verfahren und
physikalische Verfahren.

Bei den **chemischen Verfahren** wird die zu analysierende Komponente aus dem untersuchten Gemisch entfernt (durch Absorption oder Verbrennung) und ihr Anteil aus der Verringerung des Volumens des Gemischs bestimmt. Diese Verfahren entstanden aus Labormethoden und sind für eine kontinuierliche Prozeßüberwachung wenig geeignet.

Physikalisch-chemische Verfahren nutzen die bei chemischen Reaktionen auftretenden charakteristischen physikalischen Eigenschaften des Reaktionsproduktes; sie kombinieren auch die chemischen mit den physikalischen Analyseverfahren, besonders zur Spurenanalyse (quantitative Analyse mit Hilfe z. B. der Spektroskopie, Kolometrie oder Chromatografie; siehe auch Abschnitt 10).

Die **physikalischen Verfahren** dominieren heute in Meßeinrichtungen für die Überwachung und Beeinflussung von verfahrenstechnischen Prozessen. Sie nutzen physikalische Eigenschaften von Elementen, Verbindungen und Gemischen aus, gestatten eine kontinuierliche Messung und liefern Ausgangssignale, die für eine Weiterverarbeitung gut geeignet sind.

In Tafel 1 (siehe S. 49) wird eine Übersicht über die wesentlichen Verfahren zur Bestimmung von Stoffeigenschaften gegeben.

A 2. Welche Kombinationen von Aggregatzuständen (Bild 1.1) werden mit den in Tafel 1 aufgeführten Meßverfahren erfaßt? Ergänzen Sie damit Tafel 1!

Einigen der in Tafel 1 angegebenen Meßverfahren ist gemeinsam, daß der Meßwert nicht durch den unmittelbaren Vergleich mit einer Einheit (oder deren Verkörperung) ermittelt wird, sondern aus dem Vergleich einer physikalischen Eigenschaft mit der gleichen physikalischen Eigenschaft eines zweiten Meßobjekts (sog. Vergleichsverfahren²⁾).

Im Bild 1.2 ist dieses Prinzip dargestellt: es sind zwei Meßfühler erforderlich, die in je einer Meß- und einer Vergleichsstrecke (-kammer, -küvette) die jeweilige physikalische Eigenschaft auf ein Signal abbilden; der Vergleich dieser Signale liefert den gesuchten Meßwert.

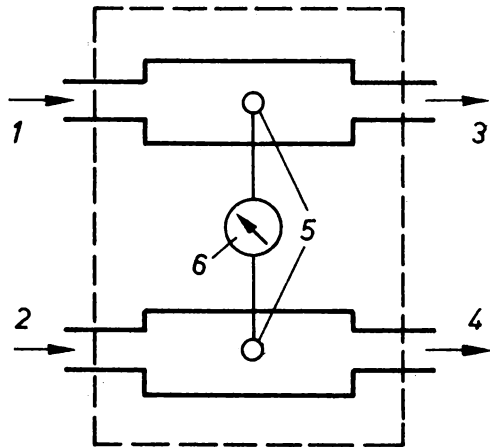


Bild 1.2: Prinzip des vergleichenden Gasanalysators

1 Meßgas; 2 Vergleichsgas; 3 Meßstrecke; 4 Vergleichsstrecke; 5 Meßfühler; 6 Meßgerät

Typische Meßverfahren, die auf diese Weise eine Meßgröße erfassen, sind das Wärmeleitverfahren (Abschnitt 9) und die optischen Analyseverfahren (Abschnitt 7).

2. Feuchtemessung

Wasser ist in seinen vielfältigen Erscheinungsformen und Bindungsformen von entscheidender Bedeutung für viele technische Vorgänge. Das Interesse an der kontinuierlichen Messung, Überwachung und Regelung des Wassergehaltes in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen ist in entwickelten Industriestaaten immer mehr angestiegen.

2) Zur Gegenüberstellung der möglichen Meßverfahren (Ausschlag-, Vergleichs-, Kompensationsverfahren) siehe Lehrmaterial-Baustein „Grundlagen für Systeme zur Informationsgewinnung“ /3/

Der Wassergehalt der atmosphärischen Luft ist in der Klimatechnik von ausschlaggebender Bedeutung.

Die Funktionstüchtigkeit pneumatischer Steuerungs- und Regelungsanlagen hängt entscheidend von der absoluten Feuchte der verwendeten Druckluft ab.

Die Produktion von Halbleiterbauelementen erfolgt unter Schutzgasatmosphäre, die einen möglichst geringen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen soll.

Im vorliegenden Abschnitt wird ein kurzer Einblick in Begriffe, Gesetzmäßigkeiten und Definitionen gegeben, die mit der Anwendung von Feuchtemeßeinrichtungen zum Zweck der Automatisierung auftreten. Einige Meßverfahren werden vom Prinzip her erläutert.

2.1. Grundlagen

Feuchte Luft bzw. feuchtes Gas setzt sich zusammen aus der trockenen Komponente und Wasser in Form von Wasserdampf. Zur Beschreibung der Eigenschaften dieses Gemisches sind die Gesetzmäßigkeiten beider Anteile zu betrachten.

Die trockene Komponente verhält sich nach der **Zustandsgleichung der idealen Gase**:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung sind

$$v = \frac{V}{m} \quad (2.2)$$

das auf die Mengeneinheit bezogene Volumen des Gases und R die **spezielle Gaskonstante**.

Mit v_o [molares Volumen/Molvolumen für ideale Gase im Normzustand ($t_o = 0^\circ \text{C}$, $p_o = 101,3 \text{ kPa} = 22,4136 \text{ l/mol}$)] erhält man aus der Zustandsgleichung die **molare Gaskonstante**

$$R_o = \frac{v_o \cdot p_o}{T_o}$$

Ihr Zahlenwert beträgt

$$R_o = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Ist n die Molzahl, so gilt für eine beliebige Gasmenge mit dem Volumen $V = n \cdot v_0$:

$$p_0 \cdot V = n \cdot R_0 \cdot T_0 \quad (2.3)$$

Das Verhalten realer Gase weicht häufig schon unter Normalbedingungen von dem idealer Gase ab und kann deshalb mit Gl. (2.2) nur näherungsweise beschrieben werden. Das Produkt $p \cdot v$ hängt stark von der Temperatur T und dem Druck p ab.

Ein feuchtes Gas als Gemisch aus trockenem Gas und Wasserdampf (im gesättigten oder ungesättigten Zustand) verhält sich nach dem Dalton'schen Gesetz. Ein bestimmtes Volumen V des trockenen Gases (Masse m_G , Druck p_G , Temperatur T) kann nur eine maximale Wasserdampfmasse aufnehmen, die bei vorgegebenen Werten für das Volumen V und die Temperatur T den Sättigungsdampfdruck p_{Ws} ergibt. Dieser Zustand wird als gesättigt bezeichnet. Liegt eine geringere Wassermasse m_W vor, so ist das feuchte Gas ungesättigt. Der Partialdruck des Wasserdampfes ist dann p_W . Der Gesamtdruck des Gasgemisches (trockenes Gas und Wasserpartialdruck) beträgt

$$p = p_G + p_W \quad (2.4)$$

Wird der Sättigungszustand überschritten, so fällt die überschüssige Wassermenge aus (Regen; Nebel, Kondenswasser).

Für jede Temperatur T gibt es eine maximal mögliche Wassermenge m_W , die in der Volumeneinheit der trockenen Komponente enthalten sein kann. Die tatsächlich in der Volumeneinheit des feuchten Gases enthaltene Wassermasse wird als **absolute Feuchte** Φ bezeichnet.

$$\Phi = \frac{m_W}{V} \quad [\Phi] = 1 \frac{g}{m^3} \quad (2.5)$$

Im genügenden Abstand vom Sättigungszustand des Wasserdampfes kann das Gasgesetz (Gl. (2.1) und (2.2)) sinngemäß Anwendung finden.

$$\Phi = \frac{m_W}{V} = \frac{p_W}{R_W \cdot T} \quad (2.6)$$

$$R_W = 0,4620 \text{ Nm g}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Die bei der Temperatur T mögliche Feuchte beträgt

$$\Phi_s = \frac{p_{Ws}}{R_W \cdot T} \quad (2.7)$$

Zur Kennzeichnung des Zustandes eines feuchten Gases werden neben der absoluten Feuchte noch weitere Größen verwendet:

- der Wasserdampfpartialdruck p_W ,
- der Feuchtegrad x ,
- die Taupunkttemperatur τ sowie
- der Quotient aus den Volumenteilen.

Der **Feuchtegrad** ist gleich der in der Masseinheit des trockenen Gases (m_G) enthaltenen Wassermasse (m_W):

$$x = \frac{m_W}{m_G} \quad [x] = 1 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad \text{oder} \quad (2.8)$$

$$= 1 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Zwischen Feuchtegrad x und absoluter Feuchte Φ gilt folgende Beziehung:

$$x = \frac{m_W}{m_G} \cdot \frac{V}{V} = \frac{m_W}{V} \cdot \frac{V}{m_G}$$

$$x = \Phi \cdot \frac{R_G \cdot T}{p - p_W} \quad (2.9.1)$$

sowie

$$x = \frac{R_G}{R_W} \cdot \frac{p_W}{p - p_W} \quad (2.9.2)$$

Die **Taupunkttemperatur** τ ist die Temperatur, bei der das feuchte Gas sich im gesättigten Zustand befindet.

Eine weitere Einheit der absoluten Feuchte eines Gases oder eines festen Stoffes ist 1 ppm (parts per million = $1 : 10^6$).

Für das **Masseverhältnis (ppm by weight)** wird angesetzt:

$$[x] = 1 \text{ ppm}_{b.w.} = \frac{1 \text{ g H}_2\text{O}}{10^6 \text{ g trockn. Gas}} \quad (2.10)$$

Für den Feuchtegrad x gilt dann

$$\frac{x}{\text{ppm}_{b.w.}} = 10^3 \frac{\frac{x}{\text{g}}}{\frac{\text{g}}{\text{kg}}} = 10^6 \frac{\frac{x}{\text{kg}}}{\frac{\text{kg}}{\text{kg}}} \quad (2.11)$$

Die **ppm-Angabe als Volumenverhältnis** ist:

$$1 \text{ ppm}_{Vol} = \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ Wasserdampf}}{1 \text{ m}^3 \text{ trockn. Gas}} = \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ Wasserdampf}}{10^6 \text{ cm}^3 \text{ trockn. Gas}} \quad (2.12)$$

Die Umrechnung der Einheit $\text{ppm}_{\text{b.w.}}$ in ppm_{Vol} erfolgt unter Anwendung der Zustandsgleichung idealer Gase (Gl. 2.1):

$$1 \text{ ppm}_{\text{Vol}} = \frac{R_W}{R_G} \cdot 1 \text{ ppm}_{\text{b.w.}}$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{Vol}} = \frac{R_W \cdot T}{p - p_W} \cdot \Phi \cdot 10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} \quad (2.13)$$

Eine weitere wichtige Angabe ist die **relative Feuchte** φ .

Sie stellt das Verhältnis zwischen der bei der Gastemperatur T vorhandenen absoluten Feuchte Φ zu der bei der Gastemperatur maximal möglichen Sättigungsfeuchtigkeit Φ_s dar. Sie wird in Prozent oder einer Zahl ≤ 1 angegeben und ist vom Gesamtdruck des feuchten Gases unabhängig.

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_s} \quad (2.14.1)$$

oder

$$\varphi = \frac{p_W}{p_{W_s}} \quad (2.14.2)$$

Vorteilhaft ist die Unabhängigkeit der relativen Feuchte φ von der Gasart.

Für die Angabe des **Wassergehaltes von Flüssigkeiten** existiert keine einheitliche Definition. Es wird in Anlehnung an die bei Luft- und Gasfeuchtemessungen üblichen Einheiten die Angabe des Wassergehaltes in ppm_{Vol} oder $\text{ppm}_{\text{b.w.}}$ vorgenommen.

Die Angabe des **Wasseranteiles in Feststoffen** erfolgt grundsätzlich in Masseanteilen. Dabei wird überwiegend die Wassermasse m_W auf die Gesamtmasse ($m_W + m_{\text{tr}}$) bezogen.

$$\Phi_f = \frac{m_W \cdot 10^2 \%}{m_W + m_{\text{tr}}} \quad (2.15)$$

Bei Bezugnahme auf die Trockenmasse ergibt sich:

$$\Phi_{tr} = \frac{m_W \cdot 10^2 \%}{m_{tr}} \quad (2.16)$$

Es existiert außerdem noch eine Angabe des **Trockengehaltes**.

$$\text{Trockengehalt} = \frac{m_{tr} \cdot 10^2 \%}{m_W + m_{tr}} \quad (2.17)$$

Zur Umrechnung der unterschiedlichen Feuchteangaben Φ_f und Φ_{tr} und des Trockengehaltes sind nachfolgende Gleichungen anzuwenden:

$$\Phi_f = \frac{100 \% \Phi_{tr}}{100 \% + \Phi_{tr}} = 100 \% \text{-Trockengehalt} \quad (2.18.1)$$

$$\Phi_{tr} = \frac{100 \% \Phi_f}{100 \% - \Phi_f} = \frac{100 \% \text{-Trockengehalt}}{\text{Trockengehalt}} \cdot 100 \% \quad (2.18.2)$$

$$\text{Trockengehalt} = 100 \% - \Phi_f = \frac{100 \% \cdot 100 \%}{\Phi_{tr} + 100 \%} \quad (2.18.3)$$

2.2. Luft- und Gasfeuchtemeßtechnik

Lithiumchlorid-Taupunktmeßfühler

Nach dem Raoult'schen Gesetz ist der Dampfdruck über einer Lösung, bezogen auf eine bestimmte Temperatur, stets niedriger als über dem reinen Lösungsmittel. Die Dampfdruckerniedrigung nimmt mit steigender Konzentration des gelösten Stoffes zu und erreicht für den Sättigungszustand ihren Maximalwert. Der Dampfdruck über der Lösung kann nur durch die Erhöhung der Lösungsmitteltemperatur die Werte für das reine Lösungsmittel erreichen. Diese Eigenschaft wird im **Lithiumchlorid-Taupunktmeßfühler** zur Messung der absoluten Gasfeuchte ausgenutzt.

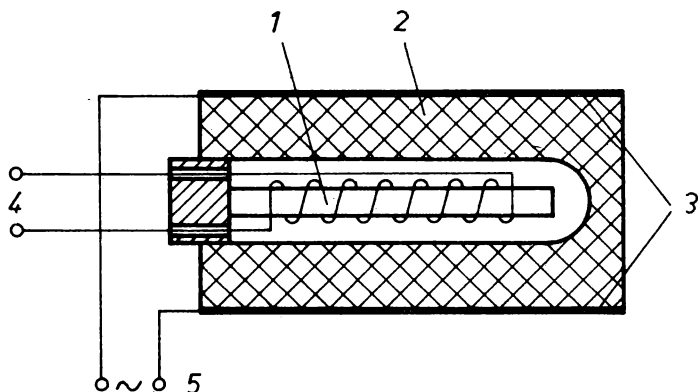


Bild 2.1: Lithiumchlorid-Feuchtemesser

- 1 Widerstandsthermometer;
- 2 LiCl-getränkte Glasseide;
- 3 Heizelektrode;
- 4 Thermometeranschluß;
- 5 Wechselstromanschluß

Der Lithiumchlorid-Taupunktmeßfühler (Bild 2.1) besteht aus einem Isolierhohlkörper, der mit einem Mantel 2 aus Glasfaser- oder Quarzglasfasergewebe umspunnen ist. Dieser Mantel ist von einem Elektrodenpaar 3 aus korrosionsfestem Material (Silber, für aggressive Medien Silber-Palladium) umgeben und mit gesättigter Lithiumchloridlösung getränkt. Innerhalb des Isolierhohlkörpers befindet sich in gut wärmeleitendem Kontakt zur Hohlkörperwandung ein Widerstandsthermometer 1.

Legt man an das Elektrodenpaar eine Spannung an, so fließt infolge der elektrolytischen Leitfähigkeit der LiCl-Lösung ein Strom, der bei der Inbetriebsetzung sehr hohe Anfangswerte annehmen kann. Infolge der hygroskopischen Eigenschaft des Lithiumchlorids und des herrschenden Dampfdruckgefälles in Richtung von der umgebenden Atmosphäre zur Oberfläche des Meßfühlers neigt die gesättigte LiCl-Lösung sofort nach der Eintränkung durch Wasseraufnahme aus der Umgebung zum Übergang in den ungesättigten Zustand, zur verdünnten Lösung. Der Stromdurchgang verursacht eine Zunahme der Lösungstemperatur, bis ein solcher Wert erreicht ist, für den ein Gleichgewicht zwischen dem Dampfdruck über der Lösung und dem Wasserdampfpartialdruck in der Umgebungsatmosphäre besteht. Eine Erhöhung der Lösungstemperatur über den Gleichgewichtswert hinaus tritt nur geringfügig und kurzzeitig auf. Für diesen Zustand kehrt sich die Richtung des Wasseraustausches zwischen Lösung und Umgebung um.

Es stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand, also eine konstante LiCl-Lösungstemperatur ein, der ein bestimmter Wasserdampfpartialdruck im umgebenden Medium zuzuordnen ist. Diese Lösungstemperatur dient somit als Maß für die absolute Luft- oder Gasfeuchte. Sie wird mit Hilfe des im Isolierkörper eingelagerten Widerstandsthermometers nach einer Eichkurve gemessen.

Taupunktthygrometer

Die Taupunkttemperatur eines Gases als Maß für die darin enthaltene absolute Feuchte kann direkt durch die Temperatur eines Metallspiegels erhalten werden, auf dem sich durch Abkühlung ein Tauniederschlag zu bilden beginnt.

Der Nachweis des sich bildenden Tauniederschlages kann über eine optische Abtasteinrichtung oder über eine solche mit einer Leitfähigkeitsstrecke erfolgen.

Den schematischen Aufbau des Taupunktthygrometers mit optischer Abtasteinrichtung zeigt Bild 2.2 .

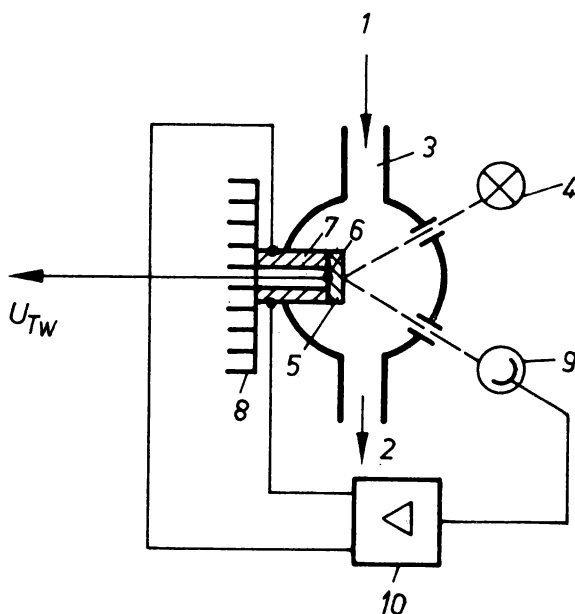


Bild 2.2: Taupunkt-Hygrometer

1 Einlaß; 2 Auslaß; 3 Meßkopf; 4 Lichtquelle; 5 Spiegel; 6 Thermoelement; 7 Peltier-Element; 8 Kühlfläche; 9 Fotoempfänger; 10 Verstärker

Das zu untersuchende Gas wird in einem Meßkopf 3 an einem Spiegel 5 vorbeigeführt. Das Gas befindet sich bereits in der Rohrleitung, in die der Meßkopf eingebaut ist, im Strömungszustand, oder es wird mittels eines Ventilators an der Austrittsöffnung 2 über die Eintrittsöffnung 1 angesaugt. Der Spiegel 5 besteht bei einer modernen Ausführung des Gerätes aus der verspiegelten Kupferbrücke an der kalten Lötstelle eines Peltier-Kühlelementes 7.

Die Wirkungsweise eines Peltier-Kühlelements beruht auf der Umkehrung des thermoelektrischen Effekts: Durch einen Gleichstrom wird in einem Stromkreis, der zwei verschiedene elektrisch leitende Materialien enthält, an einer Übergangsstelle zwischen beiden Materialien gegenüber der Umgebungstemperatur eine Abkühlung, an der anderen Übergangsstelle eine Erwärmung hervorgerufen.

Durch eines der Fenster im Meßkopf wird die Spiegelfläche von einer Lichtquelle 4 beleuchtet; der reflektierte Anteil trifft durch das zweite Fenster auf den fotoelektrischen Indikator 9. Im nicht beschlagenen Zustand steuert das Ausgangssignal des fotoelektrischen Indikators einen Verstärker 10 so weit aus, daß am Peltier-Kühlelement die maximale Kühlleistung aufgebracht wird. Die Spiegeltemperatur sinkt damit ständig ab, bis mit Unterschreitung der Taupunkttemperatur des Gases der Tauniederschlag einsetzt. Dieser bewirkt eine diffuse Reflexion des eingestrahnten Lichtes und somit über die verminderte Beleuchtung des Indikators und den Verstärker eine Herabsetzung der Kühlleistung. Die dadurch ansteigende Spiegeltemperatur läßt den Tauniederschlag wieder verschwinden. Somit kann die ursprüngliche Kühlleistung teilweise wieder erreicht werden und der beschriebene Vorgang führt nach wenigen Überschwingungen zu einem Gleichgewichtszustand. Die Spiegeltemperatur, die nur geringfügig unter der Taupunkttemperatur liegt, wird mit einem Thermoelement 6 gemessen. Sie ist somit ein Maß für die absolute Feuchte des Gases.

Psychrometer

Die Psychrometer gehören zu den klassischen Feuchtemeßgeräten, die Feuchtemessungen mit sehr kleinem Fehler ermöglichen. Sie werden vorwiegend zu Vergleichsmessungen bei der Kontrolle der Eichkurve anderer Feuchtemeßgeräte verwendet. Ihr Einsatz in der betrieblichen Meßtechnik ist stark zurückgegangen, seitdem in der Wartung und Auswertung des Meßwertes einfachere Systeme, wie der Lithiumchlorid-Taupunktmeßfühler und das hier erläuterte elektrolytische Hygrometer, entwickelt worden sind. Bei Anwesenheit von stark aggressiven Medien wird es jedoch immer noch verwendet. Daher sollen der schematische Aufbau (Bild 2.3) und die Wirkungsweise erläutert werden.

Das zu untersuchende Gas wird durch einen Ventilator angesaugt, nacheinander an einem trockenen Thermometer 2 und einem befeuchteten Thermometer 3 vorbeigeführt. Das Thermometer 3 ist mit einem Befeuchtungsstrumpf 4 überzogen, dessen Ende in einen Wasservorratsbehälter 5 eintaucht. Meist werden Widerstandsthermometer verwendet.

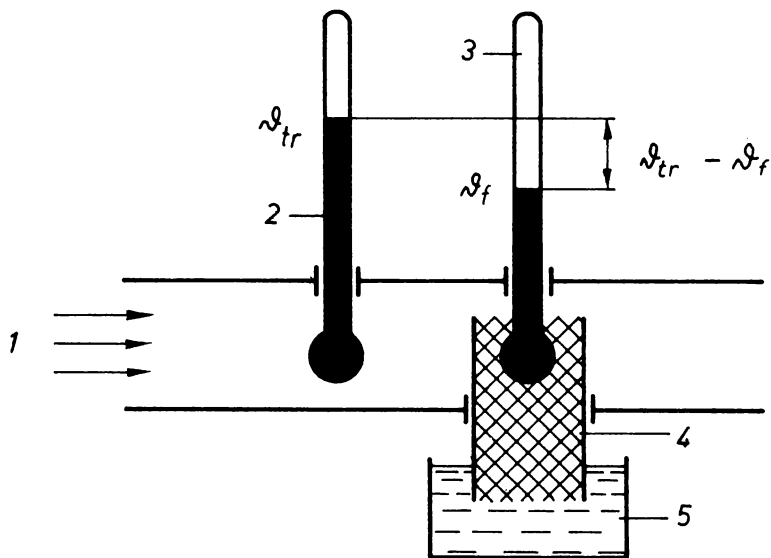


Bild 2.3: Psychrometer

1 Luftstrom; 2 trockenes Thermometer; 3 feuchtes Thermometer;
4 Gaze; 5 Wasservorratsgefäß

Das „trockene“ Thermometer nimmt die Temperatur des Gases an. Am befeuchteten Thermometer tritt ein Stoff- und Wärmeaustausch mit dem vorbeigeführten feuchten Gas ein. Der Stoffaustausch besteht in der Verdunstung von Wasser aus dem befeuchteten Thermometer und wird durch den Unterschied zwischen dem Wasserdampfpartialdruck im Gas und dem Wasserdampf-sättigungsdruck über der Wasseroberfläche bewirkt. Die Differenz beider Dampfdrücke strebt dem Wert Null zu. Die erforderliche Verdunstungswärme wird anfangs dem Wasser am Thermometer und dem Gas entzogen, so daß sich ständig mit jeder vorbeigeführten Gasvolumeneinheit erneut der Gleichgewichtsfall einstellt:

$$\begin{array}{lcl} \text{Gas-temperatur am} & & \text{Temperatur der Wasseroberfläche} \\ \text{feuchten Thermometer} & = & \text{des feuchten Thermometers} \end{array}$$

Im Gleichgewichtsfall wird die Verdunstungswärme praktisch nur vom Gas aufgebracht.

Der Unterschied zwischen der am trockenen Thermometer gemessenen Gastemperatur ϑ_{tr} und der am befeuchteten Thermometer gemessenen Temperatur ϑ_f wird als psychrometrische Differenz bezeichnet. Sie ist ein Maß für den Feuchtezustand des Gases.

Der rechnerische Zusammenhang wird durch die Gleichung (2.19) ausgedrückt.

$$p_W = p_f - p \cdot A \cdot (\vartheta_{tr} - \vartheta_f) \quad (2.19)$$

ϑ_{tr}	Temperatur des trockenen Thermometers,
ϑ_f	Temperatur des befeuchteten Thermometers,
p_W	Wasserdampfpartialdruck des Gases bei der Temperatur ϑ_{tr} ,
p_f	Wasserdampfsättigungsdruck bei ϑ_f ,
p	Gesamtdruck des Gases,
A	Psychrometer-Konstante,

(für $\vartheta_f < 0^\circ \text{C}$ ist der Wasserdampfsättigungsdruck p_f über Eis einzusetzen)

2.3. Feststofffeuchte-meßtechnik

Gleichstromleitfähigkeitsverfahren

Für eine Reihe von Feststoffen besteht im hygroskopischen Feuchtebereich ein Zusammenhang zwischen der Feuchte Φ und dem elektrischen Leitwert G , die unter den gegebenen Bedingungen entsprechend der Elektrodenanordnung folgendermaßen formuliert werden kann:

$$G = a \cdot b \cdot \Phi \quad (2.20)$$

G Leitwert

a, b empirische Angabe entsprechend der Elektrodenanordnung

Die Leitfähigkeit feuchter Stoffe im hygroskopischen Bereich beruht auf dem Vorhandensein von Ionen. Sie ist aber auch von der Eigenleitfähigkeit des Feststoffes abhängig. Der Zusammenhang zwischen der Feuchte und dem elektrischen Leitwert G kann durch eine Reihe anderer Faktoren (Kornform, Oberflächenbeschaffenheit, Art des Feststoffes, Temperatur) erheblich beeinflußt werden, daher ist die Elektrodenanordnung bei der konstruktiven Gestaltung des Gerätes von großer Bedeutung.

Die Feuchteverteilung des Meßgutes hat Einfluß auf den Meßwert. Bei bahnförmigem Feststoff ist nicht zu erwarten, daß über die gesamte Fläche eine gleichmäßige Feuchteverteilung vorliegt. Bei Abtastung des Meßgutes durch mehrere parallelgeschaltete Elektroden ist der Meßwert vorwiegend durch die an der feuchtesten Stelle herrschende Leitfähigkeit gegeben.

Bei faserartigen Stoffen ist auch eine Abhängigkeit des Meßwertes von der Lage der Elektroden zur Faserrichtung feststellbar. Die elektrische Erfassung des Gleichstromleitwertes erfolgt vorwiegend mittels eines mit konstanter Spannung gespeisten Spannungsteilers, der aus der Leitfähigkeitsstrecke des Feststoffes zwischen den Elektroden und einem Festwiderstand gebildet wird.

Die Einrichtung wird vorwiegend zur Messung bzw. Regelung der Restfeuchte in der Papierindustrie eingesetzt; auch Feuchtemessungen bei Getreidemehl sind bekannt.

Dielektrische Verfahren

Das Wasser hat eine hohe relative Dielektrizitätskonstante von $\epsilon_r \approx 81$ im Vergleich zu den übrigen Stoffen. Der ϵ_r -Wert trockener Stoffe liegt bei < 10 . Daraus ergibt sich für den feuchten Stoff eine z. T. erhebliche Veränderung der relativen Dielektrizitätskonstanten.

Das Meßprinzip ist einfach. Das Meßgut wird zwischen den Platten eines Kondensators hindurchgeführt oder es bewegt sich über einen Streufeldkondensator. Die Kapazität eines solchen Meßkondensators wird durch die geometrische Anordnung bestimmt (Fläche der Kondensatorplatten und Plattenabstand), der eine Grundkapazität

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s} \quad (2.21)$$

im ungefüllten Zustand entspricht. Die Füllung bzw. Bedeckung mit feuchtem Meßgut führen zur Kapazitätsveränderung. Die Kapazität des mit Meßgut gefüllten Kondensators ist:

$$C = \epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot C_0 \quad (2.22)$$

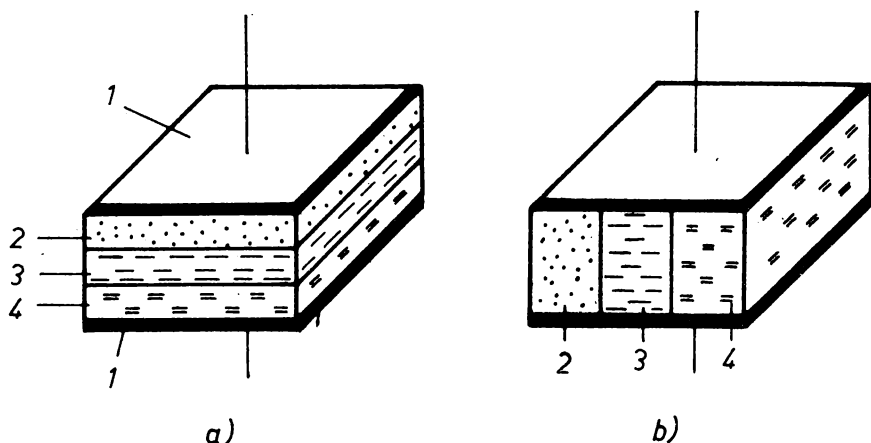


Bild 2.4: Meßkondensator

a) horizontale Schichtung

b) vertikale Schichtung

1 Elektrode; 2 Gas (Luft); 3 Wasser; 4 Trockensubstanz

Es existieren die im Bild 2.4 angeführten Grenzfälle a und b, für die sich die Kapazität C folgendermaßen ergibt:

- a) Die Schichtung verläuft parallel zur Kondensatorebene und es liegt damit eine Reihenschaltung dreier Kapazitäten vor.

$$C_{\text{Luft}} = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s_L} \quad , \quad C_{\text{Wasser}} = \epsilon_{r_W} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s_W}$$

$$C_{\text{Trock.}} = \epsilon_{r_{Tr}} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s_{Tr}}$$

Die Gesamtkapazität der Anordnung ist nach Gl. (2.22)

$$C = \epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot C_0 = \epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s}$$

mit $s = s_L + s_W + s_{Tr}$

und ergibt sich aus den Einzelkapazitäten zu

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\text{Luft}}} + \frac{1}{C_{\text{Wasser}}} + \frac{1}{C_{\text{Trock.}}} \quad (2.23)$$

Daraus folgt für die resultierende relative Dielektrizitätskonstante

$$\epsilon_{r_{\text{res}}} = \frac{s}{s_L + \frac{1}{\epsilon_{r_W}} s_W + \frac{1}{\epsilon_{r_{Tr}}} s_{Tr}} \quad (2.24)$$

- b) Die Schichtung verläuft senkrecht zur Kondensatorebene und es liegt damit eine Parallelschaltung dreier Kapazitäten vor.

- A 3.** Schreiben Sie die Gleichung zur Berechnung der Gesamtkapazität für die Parallelschaltung der 3 Einzelkapazitäten nach Bild 2.4 b) auf!

$$C = \quad (2.25)$$

- A 4.** Berechnen Sie die resultierende relative Dielektrizitätskonstante der Anordnung nach Bild 2.4 b)!

$$\epsilon_{r\text{res}} = \quad (2.26)$$

Die Messung der Feuchte nach dem dielektrischen Verfahren ist auf Grund der vorhandenen Leitfähigkeit des Meßgutes mit dielektrischen Verlusten verbunden. Somit liegt mit dem Meßkondensator kein reiner Blindwiderstand vor.

Es werden die verschiedensten Schaltungen verwendet, um unter Ausnutzung der Blind- und/oder der Wirkleitwertveränderung des Meßkondensators eine eindeutige feuchteabhängige elektrische Größe zu erhalten.

Für eine automatische Messung der Feststofffeuchte haben sich Brückenschaltungen nach der Ausschlagmethode (die Brücke besteht vorwiegend aus Blindwiderständen) und Spannungsteilerschaltungen bewährt.

Zur Bestimmung der Kapazitätsänderungen ist die Wahl der Meßfrequenz von besonderem Interesse. Sie muß so gewählt werden, daß Polarisationserscheinungen nicht auftreten. Zu hohe Frequenzen erfordern kleine Meßkondensatoren, die für ein großes Meßvolumen nachteilig sind. Es werden vorwiegend Frequenzen unter 1 Mhz verwendet.

Änderungen der Zusammensetzung des Trockenanteils im Meßgut haben nach Gl. (2.24) und Gl. (2.26) über $\epsilon_{r\text{Tr}}$ Einfluß auf die resultierende relative Dielektrizitätskonstante und damit auf das Meßergebnis. Bei Nichtbeachtung dieses Einflusses können sich falsche Schlußfolgerungen hinsichtlich der im Feststoff enthaltenen Feuchte ergeben.

Beispiel: Der schwankende Aschegehalt der Trockenbraunkohle bei der Brikettierung von 4 % auf 6 % kann dazu führen, daß der angeblich gemessene Wassergehalt plötzlich um mehrere Prozent zunimmt, obwohl die technologischen Bedingungen nicht verändert wurden. Wird dies nicht erkannt, so führt die Fehlanzeige zur Übertrocknung der Rohbraunkohle im Trockner, zu einem Brand und somit zu einer Verpuffung.

Einfluß auf das Ergebnis einer Feuchtemessung haben auch die Dichte und die Kornform des Meßgutes. Auch der im Meßkondensator eingeschlossene Luftanteil kann Meßwertfälschungen verursachen.

Die Temperatur des Meßgutes hat ebenfalls einen Einfluß auf die relative Dielektrizitätskonstante. Während ϵ_r für Wasser mit steigender Temperatur abnimmt, kann der Temperaturkoeffizient für ϵ_r bei den unterschiedlichen Trockensubstanzen sowohl positiv als auch negativ sein.

Trotz eines wirtschaftlichen Aufwandes der Feuchtemessung nach dem dielektrischen Verfahren sind die Mängel beim industriellen Einsatz erheblich.

2.4. Zusammenfassung

Feuchtemessungen sind in einer Vielzahl von technologischen Prozessen bei Gasen und Feststoffen notwendig. Es wird zwischen der absoluten Feuchte, dem Feuchtegrad und der relativen Feuchte unterschieden.

A 5. Wie ist die absolute Feuchte definiert?

A 6. Wie ist der Feuchtegrad definiert?

Für Feuchtemessungen sind Lithiumchlorid-Taupunktmeßfühler, Taupunkthygrometer, Psychrometer, Gleichstromleitfähigkeitsverfahren und dielektrische Verfahren geeignet.

A 7. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Taupunkthygrometers!

- A 8.** Beschreiben Sie den Zusammenhang zwischen den resultierenden relativen Dielektrizitätskonstanten und der absoluten Feuchte beim dielektrischen Verfahren der Feuchtemessung!

3. Bestimmung des spezifischen Brennwertes (Verbrennungswärme) und des spezifischen Heizwertes (Heizwert) fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe

3.1. Begriffserläuterung

Spezifischer Brennwert (Verbrennungswärme/oberer Heizwert) und spezifischer Heizwert (Heizwert/unterer Heizwert) sind die bei der Verbrennung von Brennstoffen freiwerdenden Wärmemengen. Sie geben eine Berechnungsgrundlage für die Feuerungs- und Vergasungstechnik.

Die bei der Verbrennung eines Brennstoffes freiwerdende Wärmemenge hängt ab

- von der Art und dem Zustand des zu verbrennenden Stoffes und
- von der Art und dem Zustand der Stoffe, die durch die Verbrennung entstehen.

Als **spezifischer Brennwert** (Verbrennungswärme/oberer Heizwert) H_o eines Brennstoffes wird die Wärmemenge bezeichnet, die bei vollständiger Verbrennung einer Masseinheit Brennstoff, bezogen auf eine Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die seiner Verbrennungserzeugnisse von 20°C , frei wird.

Hierbei müssen

- das vor der Verbrennung im Brennstoff enthaltene und das durch die Verbrennung zusätzlich gebildete Wasser nach der Verbrennung in flüssigem Zustand und

- die Verbrennungserzeugnisse von Kohlenstoff und Schwefel restlos als Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid in gasförmigem Zustand vorliegen,

wobei eine Oxydation des Stickstoffes nicht stattfinden darf.

Als **spezifischer Heizwert** (Heizwert/unterer Heizwert) H_u eines festen Brennstoffes wird die Wärmemenge bezeichnet, die bei vollständiger Verbrennung einer Masseinheit Brennstoff frei wird, bezogen auf eine Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die seiner Verbrennungserzeugnisse von 20 °C. Hierbei müssen

- das vor der Verbrennung im Brennstoff enthaltene und das durch die Verbrennung zusätzlich gebildete Wasser nach der Verbrennung in dampfförmigem Zustand von 20 °C und
- die Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff und Schwefel restlos als Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid in gasförmigem Zustand vorliegen,

wobei eine Oxydation des Stickstoffes nicht stattfindet.

3.2. Bestimmungsverfahren

Die lufttrockene Brennstoffprobe wird in einer Kalorimetrischen Bombe verbrannt, die sich in einem mit Wasser gefüllten Metallbecher befindet. Die bei der Verbrennung des Brennstoffes entstehende Wärmemenge erhöht die Temperatur des Kalorimetersystems. Aus den Temperaturänderungen des Kalorimetersystems vor, während und nach der Bestimmung werden die entwickelten Kalorien errechnet. Die Berechnung des Temperatúraustausches stützt sich auf das Newtonsche Abkühlungsgesetz und setzt voraus, daß die Umgebungstemperatur des Kalorimetersystems konstant ist. Dies wird weitgehend dadurch erreicht, daß das Kalorimetersystem mit einem Wassermantel umgeben ist. Zur Konstanthaltung der Temperatur des Wassermantels ist ein Thermostat zu benutzen. Aus der berichtigten Temperaturerhöhung und dem Wasserwert des Kalorimeters ergibt sich die Verbrennungswärme, die auf den Heizwert des Brennstoffes umgerechnet wird.

Spezifischer Brennwert (Verbrennungswärme/oberer Heizwert) und spezifischer Heizwert (Heizwert/unterer Heizwert) von Brennstoffen werden in MJ/kg oder MJ/m³ ausgedrückt.

Berechnung des spezifischen Brennwertes

Der spezifische Brennwert (Verbrennungswärme/oberer Heizwert) des lufttrockenen Brennstoffes $H_o(i, \text{Ifr.})$ ergibt sich nach der Gleichung (3.1):

$$H_o(i, \text{Ifr.}) = \frac{Ww \cdot (t_m + C - t_o) - \Sigma B}{m} \quad (3.1)$$

In dieser Gleichung bedeuten:

Ww	Wasserwert des Kalorimeters in MJ/K
t_o	Temperatur bei der ersten Ablesung des Hauptversuches
t_m	Temperatur bei der letzten Ablesung des Hauptversuches

C	Berichtigung für den Wärmeaustausch zwischen Kalorimeter und Umgebung
ΣB	Summe der Berichtigungen für gemessene Wärmemengen, die der Begriffs- erklärung der Verbrennungswärme nicht entsprechen
m	Einwaage an Brennstoff (lfr.) in kg

Der Wasserwert wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Ww = \frac{E \cdot m_i + Bz}{t_m - t_o + C} \quad (3.2)$$

E	bekannter spezifischer Brennwert der Eichsubstanz in MJ/kg
m_i	Einwaage an Eichsubstanz in kg
Bz	spezifischer Brennwert für Zusatzstoffe
C	Berichtigungsgröße

Berechnung des spezifischen Heizwertes

Der spezifische Heizwert (Heizwert/unterer Heizwert) des lufttrockenen Brennstoffes $Hu_{(i,lfr.)}$ wird aus dem spezifischen Brennwert des lufttrockenen Brennstoffes $Ho_{(i,lfr.)}$ nach Gleichung (3.3) berechnet:

$$\begin{aligned} Hu_{(i,lfr.)} &= Ho_{(i,lfr.)} - 24,5 \cdot W & \text{MJ/m}^3 \\ \text{bzw. } Hu_{(i,lfr.)} &= Ho_{(i,lfr.)} - 24,5 \cdot W & \text{MJ/kg} \end{aligned} \quad (3.3)$$

W bei der Elementaranalyse anfallendes Wasser der lufttrockenen Probe in % (Feuchtigkeit des lufttrockenen Brennstoffes + Wasser aus den Wasserstoffverbindungen des Brennstoffes)

Bedeutung der WOBBEZAHL

In der gaserzeugenden und gasanwendenden Industrie wird stets ein gleichbleibendes Brennverhalten der verschiedenen Brenner angestrebt. Die hierzu erforderliche Einhaltung der brenntechnischen Qualität des Gases wird im wesentlichen mit Hilfe des Quotienten

$$\frac{\text{spezifischer Brennwert}}{\sqrt{\frac{\text{Gasdichte}}{\text{Luftdichte}}}} = \frac{Ho}{\sqrt{d_v}} \quad (3.4)$$

gemessen und korrigiert. Der Quotient stellt eine Heizleistungs- und Luftbedarfskennzahl dar, die allgemein unter dem Begriff **Wobbezahl** bekannt ist. Da einerseits Heizleistung und Luftbedarf von Brennern der Wobbezahl direkt proportional sind, andererseits aber auch Flammenlängen und Grenzen der vollkommenen Verbrennung direkt von ihr abhängen, ist die Überwachung des Brennverhaltens durch Messung der Wobbezahl erforderlich.

Das genaueste Gerät hierfür ist der PRÄZISIONS-WOBBEZAHLGEBER Modell DK, der die Einhaltung der geforderten Genauigkeit zur Konstanz von Heizleistung und Luftbedarf durch Messung der Wobbezahl und die Übertragung auf Anzeige- bzw. Registriergeräte oder Regler ermöglicht (Hersteller: VEB Junkalor, Dessau).

3.3. Zusammenfassung

Spezifischer Brennwert (Verbrennungswärme/oberer Heizwert) und spezifischer Heizwert (Heizwert/unterer Heizwert) sind wichtige Kenngrößen fester, flüssiger und gasförmiger Brennstoffe.

A 9. Erläutern Sie den Unterschied zwischen diesen beiden Größen!

A 10. Wovon hängt die bei der Verbrennung eines Stoffes freiwerdende Wärmemenge ab?

Zur Bestimmung des spezifischen Brennwertes werden Kalorimetersysteme angewendet. Für die gaserzeugende und die gasanwendende Industrie hat die Wobbezahl eine große Bedeutung.

4. Dichtemessung

Die Messung der Dichte von Flüssigkeiten oder Gasen erfolgt im Labor durch Wägung bekannter Volumina oder durch Messung des Auftriebs von Körpern mit bekanntem Volumen und bekannter Masse, die in das zu messende Medium eintauchen oder von diesem umgeben sind.

In die Prozeßmeßtechnik sind diese Prinzipien übernommen worden. Sie werden ergänzt durch Meßverfahren, die mit radioaktiven Präparaten arbeiten. Diese sind besonders vorteilhaft einsetzbar für Messungen unter extremen Bedingungen (Temperatur, Druck, Aggressivität, Phasengemische), da kein Eingriff in den Stoffstrom erforderlich ist.

4.1. Flüssigkeitsdichte

Bild 4.1 zeigt das Prinzip der **Dichtemessung** von Flüssigkeiten durch **Ausnutzung des hydrostatischen Auftriebes** eines Körpers bekannter Masse und bekannten Volumens. Durch konstruktive Gestaltung des Meßgefäßes (im Bild 4.1 durch angebrachte Prallbleche) muß ein möglicher dynamischer Auftrieb vermieden werden. Die Standhöhe des Auftriebskörpers in der Flüssigkeit wird direkt gemessen oder in ein weiteres Abbildungssignal (z. B. in ein elektrisches) gewandelt und steht damit zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Der Temperatureinfluß auf die Dichte muß entweder rechnerisch berücksichtigt oder durch Zusatzeinrichtungen kompensiert werden.

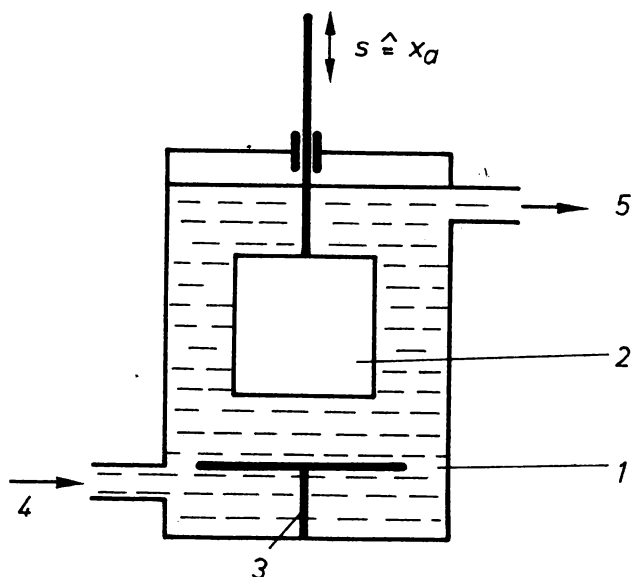


Bild 4.1: Dichtemeßeinrichtung mit Auftriebskörper

1 Meßgefäß; 2 Auftriebskörper; 3 Prallbleche; 4 Zufluß; 5 Abfluß

Unabhängig vom Druck der zu messenden Flüssigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit arbeiten **Dichtemeßeinrichtungen nach dem Wägeprinzip**. Von den möglichen Bauformen zeigt Bild 4.2 schematisch eine einseitig drehbar gelagerte Rohrschleife 1, die über richtkraftlose Anschlüsse 2 von der Meßflüssigkeit durchströmt wird.

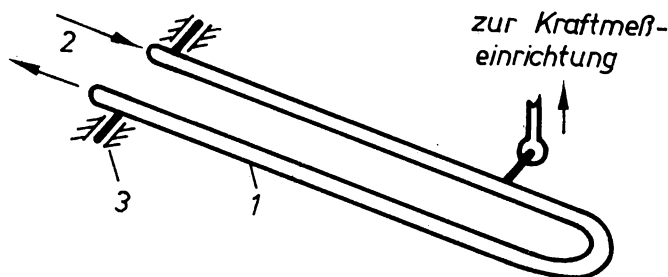


Bild 4.2: Dichtemessung durch Wägung

1 Rohrschleife; 2 Anschlüsse für Zu- und Abfluß; 3 Drehachse

Je nach Dichte dieser Flüssigkeit wirkt an der Drehachse 3 ein Drehmoment, das entweder mechanisch (Prinzip der Balkenwaage) oder elektrisch (über Dehnmeßstreifen oder mittels Kraftmeßdose) gemessen wird und ein Maß für die Dichte der Meßflüssigkeit ist. Die Meßtemperatur ist die der Flüssigkeit im Rohr.

In neuerer Zeit sind **Dichtemessungen mit radioaktiven Isotopen** bekannt geworden. Die Absorption von radioaktiver Strahlung hängt von der Dichte des durchstrahlten Mediums ab. Da die Aktivität einer Strahlungsquelle infolge des Zerfalls mit der Zeit abnimmt (diese Abnahme ist durch die Halbwertszeit charakterisiert), ist eine Vergleichsmessung notwendig. Das Prinzip ist im Bild 4.3 dargestellt.

Die Strahlungsintensität wird einmal hinter der Meßstrecke und gleichzeitig direkt gemessen. Die Intensitätsdifferenz charakterisiert die Dichte des Meßgutes und ist unabhängig von seiner Strömungsgeschwindigkeit. Die Messung erfolgt ohne Eingriff in den Stoffstrom und ist für flüssige, pulvrige, körnige oder auch feste Stoffe geeignet.

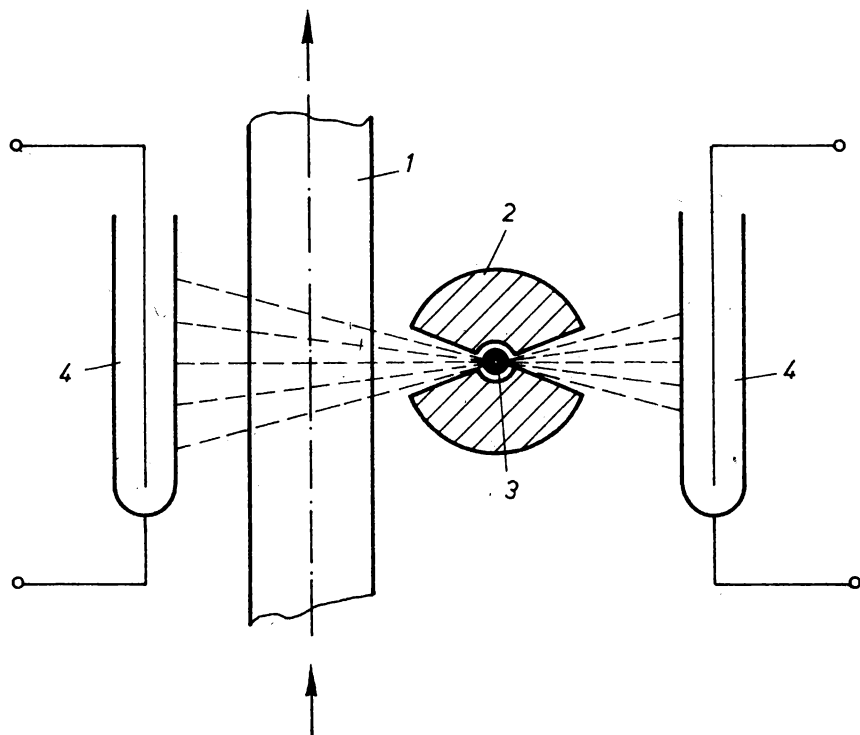


Bild 4.3: Dichtemessung mit radioaktiven Isotopen

1 durchstrahltes Rohr; 2 Abschirmung; 3 Strahlungsquelle; 4 Zählrohr

4.2. Gasdichte

Gasdichtemesser arbeiten ebenfalls unter **Ausnutzung des archimedischen Prinzips** (des hydrostatischen Auftriebes).

Die übliche Bauform besteht aus einem zweiarmligen Hebel (Bild 4.4), der an einem Ende eine geschlossene, stickstoffgefüllte Glaskugel und am anderen Ende eine offene Glaskugel, mit gleicher Oberfläche wie die geschlossene Kugel, trägt. Die Oberflächen-gleichheit soll Absorptionseinflüsse vermeiden. Dieser Hebel ist ein Waagebalken, der durch Zusatzeinrichtungen (im Bild 4.4 nicht gezeichnet) austariert wird. Die gesamte Einrichtung befindet sich in einem geschlossenen Gehäuse, das vom Meßgas durchströmt wird; die Neigung des Waagebalkens ist ein Maß für die Dichte des Meßgases. Eine im Bild 4.4 nicht gezeichnete Membrandose am Waagebalken kompensiert eine mögliche Druckdifferenz zwischen der Stickstofffüllung und dem Meßgas.

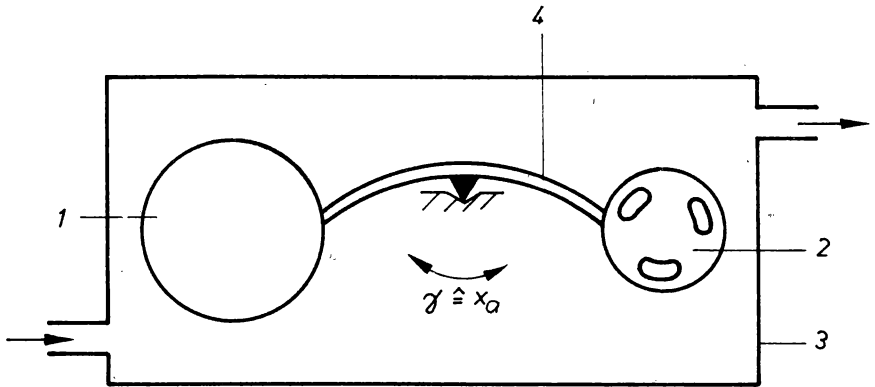


Bild 4.4: Gasdichtemeßeinrichtung

- 1 stickstoffgefüllte Glaskugel;
- 2 offene Glaskugel; 3 Gehäuse;
- 4 Waagebalken

4.3. Zusammenfassung

Typische Verfahren zur Messung der Dichte von Flüssigkeiten und Gasen sind die Auftriebsverfahren. Dichtemessungen sind ferner nach dem Wägeprinzip und mit Hilfe radioaktiver Isotope möglich.

A 11. Nennen Sie wesentliche Merkmale der radioaktiven Dichtemessung!

Radioaktive Dichtemessungen sind als Meßverfahren bei extremen Bedingungen geeignet.

5. pH-Wert-Messung

Die Wasserstoffionenkonzentration ist ein Maß für die Stärke einer Säure und nach dem Massenwirkungsgesetz auch für die einer Base. Zur bequemen Handhabung ist als **pH-Wert** der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration c_{H^+} definiert:

$$pH = -\log_{10} c_{H^+} . \quad (5.1)$$

Dem pH-Wert 0 entspricht demnach eine starke Säure (Salzsäure), $pH = 14$ eine starke Lauge (Natronlauge); $pH = 7$ entspricht einer neutralen Flüssigkeit. Es sind Lösungen bekannt, die ihren pH-Wert bei Zugabe von Säuren oder Laugen praktisch nicht ändern, so zum Beispiel verdünnte Essigsäure mit Natriumacetat. Diese Mischungen schwacher Säuren mit einem ihrer Salze heißen Pufferlösungen und dienen als Bezugslösungen bei der pH-Wert-Messung.

Die Messung der Wasserstoffionenkonzentration ist möglich durch Eintauchen von speziellen Elektroden in die zu untersuchende Lösung, wobei diese ein vom pH-Wert abhängiges Potential annehmen:

$$E = E_N - K_N \cdot pH . \quad (5.2)$$

Darin ist K_N die sog. **Nernstkonstante**:

$$K_N = \left[58 + 0,2 \frac{1}{\vartheta} (\vartheta - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) \right] \text{ mV} .$$

ϑ ist die Temperatur während der Messung.

Bild 5.1 a) zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Glaselektrode, die in der Praxis am häufigsten als Meßelektrode verwendet wird. Sie besteht aus einem Glasrohr mit einer angeschmolzenen Kugel aus leitfähigem Spezialglas und ist mit Pufferlösung gefüllt, in die eine Ableitelektrode eintaucht. Befindet sich die Glaselektrode in einer Lösung mit dem pH-Wert x , der von dem der Pufferlösung verschieden ist, so entsteht zwischen der Innen- und Außenwand der Glaskugel eine Potentialdifferenz, die dem pH-Wert x entspricht. Das äußere Potential wird mit einer Bezugselektrode erfaßt, deren prinzipiellen Aufbau Bild 5.1 b) wiedergibt. Sie besteht aus einem mit KCl-Lösung gefülltem Glasrohr, in das ebenfalls eine Ableitelektrode eintaucht. Die galvanische Verbindung nach außen stellt ein Diaphragma (Glasfritte, Keramik) her. Die Ableitelektroden sind meist Kalomelelektroden, d. h., sie enthalten als Potentialbildner Kalomel (Hg_2Cl_2).

Werden Meß- und Bezugselektrode in die zu untersuchende Lösung gebracht, so ist zwischen ihnen die Potentialdifferenz meßbar. Sie beträgt maximal etwa 600 mV für pH-Werte zwischen 0,5 und 11. Da die Elektroden nicht belastet werden können (ihr Innenwiderstand ist $> 10^9 \Omega$), sind Messungen nur mit empfindlichen Verstärkern¹⁾ oder Kompensatoren²⁾ möglich.

1) Siehe Lehrmaterial-Baustein „Elektrische und elektronische Verstärker“ /4/

2) Siehe Lehrmaterial-Baustein „Systeme zur Messung elektrischer Größen“ /5/

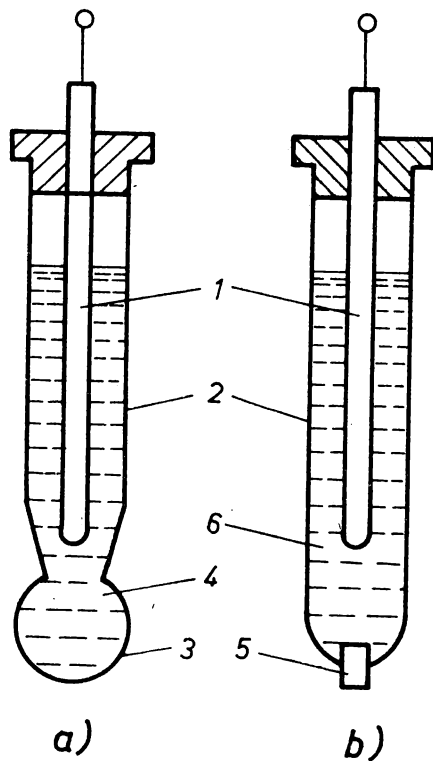


Bild 5.1: Elektroden zur pH-Wert-Messung

a) Glaselektrode; b) Bezugselektrode

1 Ableitelektrode; 2 Glasrohr; 3 leitfähiges Spezialglas; 4 Pufferlösung;
 5 Diaphragma; 6 KCl-Lösung

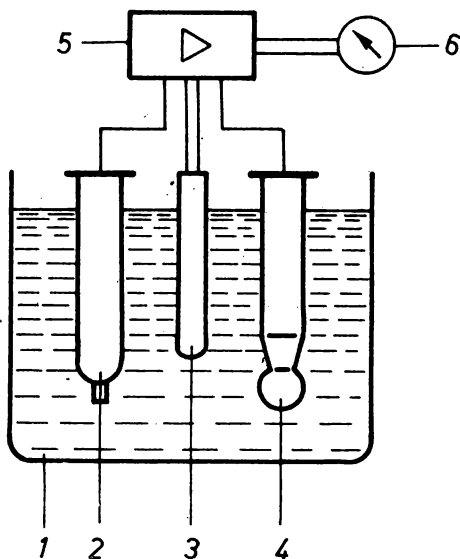


Bild 5.2: Schaltbild zur pH-Wert-Messung

1 zu messende Lösung; 2 Bezugelektrode; 3 Widerstandsthermometer;
4 Meßelektrode; 5 Meßverstärker; 6 Anzeigegerät

Bild 5.2 zeigt die prinzipielle Schaltung zur Messung des pH-Wertes. Das Widerstandsthermometer dient zur Korrektur der Temperaturabhängigkeit der Elektrodenpotentiale. Moderne Geräte gestatten Messungen mit Abweichungen von $\pm 0,05$ pH.

6. Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Der Salzgehalt von wäßrigen Lösungen, Brauch- und Trinkwasser ist wegen des Ionengehaltes als elektrische Leitfähigkeit meßbar. Der Leitwert G ist der Kehrwert des elektrischen Widerstandes R :

$$G = \frac{1}{R} = \frac{A}{\rho l} = \frac{\kappa A}{l} \quad (6.1)$$

mit ρ als spezifischem Widerstand oder κ als elektrische Leitfähigkeit, A als Meßfläche und l als Elektrodenabstand.

In der Meßeinrichtung nach Bild 6.1 ist A die Elektrodenfläche und l ihr Abstand. Die Meßelektroden bilden einen Zweig einer Brückenschaltung.¹⁾ Damit ist die Salzgehaltsbestimmung auf eine Widerstandsrmessung zurückgeführt.

1) Siehe Lehrmaterial-Baustein „Systeme zur Messung elektrischer Größen“ /5/

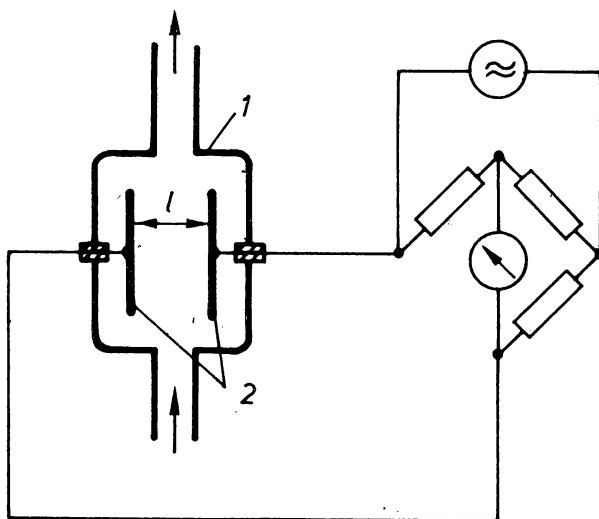


Bild 6.1.: Prinzip der Leitfähigkeitsmessung
1 Meßkammer; 2 Elektroden

Die starke Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Elektrolyten wird durch eine gleichzeitige, im Bild 6.1 nicht mit dargestellte Temperaturmessung berücksichtigt und kompensiert. Die Schaltung wird wegen der möglichen Polarisation mit Wechselspannung betrieben; die Elektroden bestehen aus Nickel, Platin oder korrosionsbeständigem Stahl.

Für Salzgehaltsmessungen von Kesselspeisewasser beträgt der Meßbereich z. B. $0 \dots 20 \mu\text{Scm}^{-1}$. Dabei entspricht $1 \mu\text{Scm}^{-1}$ etwa einer Konzentration NaCl von $0,5 \text{ mg/l}^{(1)}$.

Im Bild 6.2 sind die Leitfähigkeitswerte über der Konzentration für verschiedene Komponenten aufgetragen.

Wird die Konzentration zwischen 0 und 100 % variiert und jeweils die Leitfähigkeit bestimmt, so durchläuft diese bei etwa 10 bis 30 % ein Maximum und geht für hohe Konzentrationen wieder gegen Null. Die im Bild 6.2 erfaßten sind jedoch die für die Betriebspraxis wichtigen Konzentrationen.

1) Die Einheit Scm^{-1} entsteht durch Einsetzen der Stromdichte in A/cm^2 und des Spannungsabfalls in V/cm :
 $1 \text{ Scm}^{-1} = 1 \text{ Acm}^{-2} \cdot 1 \text{ V}^{-1} \text{ cm}$.

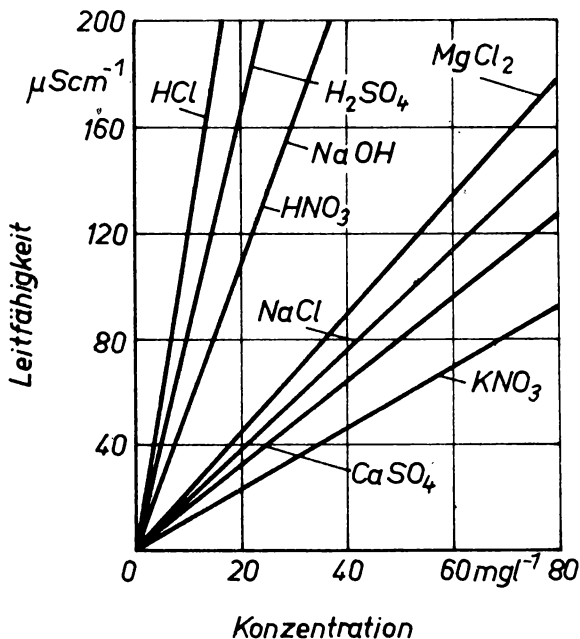


Bild 6.2: Leitfähigkeit verschiedener Lösungen bei 18 °C.

7. Messung optischer Eigenschaften

Nichtelementare Gase, das sind Gase mit Molekülen aus verschiedenen Elementen, absorbieren infrarote Strahlen. Die absorbierten Wellenlängen sind für die jeweilige Komponente charakteristisch und heißen **Banden**. Im Bereich $\lambda = 2 \dots 6 \mu\text{m}$ liegen z. B. einige Absorptionsbanden von CO, CO₂, H₂O, CH₄ und C₂H₆.

Mit einem Strahler veränderlicher Wellenlänge wäre also ein Nachweis dieser Banden – und damit die Anwesenheit des zugehörigen nichtelementaren Gases – möglich (dispersive Spektrometrie). Für die Betriebspraxis ist dieser Weg nicht gangbar; hier werden Strahler verwendet, die über einen größeren Wellenbereich strahlen (nicht-dispersive Spektrometrie). Die Unterscheidung der Gase erfolgt durch Filterung oder dadurch, daß als Strahlungsempfänger das nachzuweisende Gas selbst benutzt wird. Das letztgenannte Prinzip heißt **positive Filterung** und wird am häufigsten angewendet; die **negative Filterung** (das erstgenannte Prinzip) wird damit kombiniert, um sich überdeckende Banden durch störende Beimengungen anderer als der zu bestimmenden Komponente aufzulösen.

Bild 7.1 zeigt das Prinzip eines Infrarot-Gasanalysators. Die von Infrarotstrahlern ausgehenden Strahlen durchsetzen die Vergleichs- und Meßkammer und treffen auf die Empfängerzellen, die mit der zu bestimmenden Komponente gefüllt sind. Durch die Meßkammer strömt das zu untersuchende Gasgemisch, die Vergleichszelle enthält meistens N_2 oder ist evakuiert.

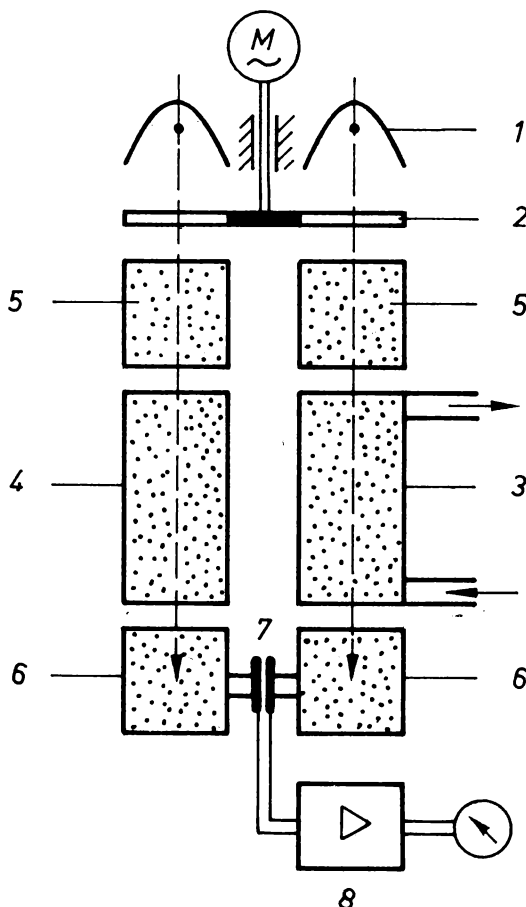


Bild 7.1: Infrarot-Gasanalysator

1 Infrarotstrahler; 2 Blendenrad; 3 Meßkammer; 4 Vergleichskammer;
5 Filterkammer; 6 Empfängerzelle; 7 Membrankondensator; 8 Ver-
stärker

Die Empfängerzellen stehen über einen Membrankondensator in Verbindung, der durch eine feste, gasdurchlässige Elektrode und eine dünne Membran als Gegenelektrode gebildet wird. Die Strahlen werden durch eine netzsynchron angetriebene Blendscheibe periodisch unterbrochen und in der Meßkammer je nach Konzentration der jeweiligen Komponente vom Meßgas absorbiert, während sie durch die Vergleichskammer ungehindert durchtreten.

Die Empfängerzellen heizen sich deshalb unterschiedlich auf; je größer die Absorption im Meßgas war, um so weniger wird die zugehörige Empfängerzelle aufgeheizt werden und um so größer ist die Druckdifferenz zwischen beiden Empfängerzellen. Diese Druckdifferenz wirkt auf den Membrankondensator, dessen Kapazitätsänderung verstärkt und angezeigt wird und die Konzentration des Meßgases angibt. Die vor Meß- und Vergleichskammer liegenden Filterkammern dienen zur Ausfilterung störender Komponenten, weil sich z. B. die Banden von CH_4 und C_2H_6 oder CO und CO_2 teilweise überdecken. Durch Thermostaten werden auch hier störende Temperatureinflüsse ausgeschaltet. Die Meßbereiche richten sich nach den zu bestimmenden Gasen (z. B. 0 ... 0,005 Vol.-% CO_2 ; 0 ... 0,05 Vol.-% CH_4); die Meßunsicherheit beträgt etwa $\pm 3\%$ vom Meßbereichsendwert.

A 12. Im Bild 7.1 ist ein Membrankondensator zusammen mit den Empfängerzellen das Umformglied für die Strahlungsenergie in elektrische Energie. Überlegen Sie, welche weitere Möglichkeit dafür prinzipiell besteht!

Optische Verfahren sind auch einsetzbar für die quantitative Analyse farbiger Lösungen, die durch sie hindurchtretendes Licht absorbieren. Nach diesem Prinzip arbeitende Geräte heißen **Kolorimeter**.

Weiter haben einige Stoffe die Eigenschaft, die Polarisationssebene des durch sie hindurchtretenden Lichts zu drehen (z. B. Glukose, ätherische Öle, Terpentin u. ä.); Geräte, die diesen Effekt ausnutzen, heißen **Polarimeter**.

Sowohl Kolorimeter als auch Polarimeter sind **Vergleichsverfahren** wie die Infrarot-Gasanalysatoren, es wird jeweils der Unterschied von Absorption bzw. Drehung der Polarisationssebene gegen die einer Vergleichsflüssigkeit als Maß für die gesuchte Größe bestimmt.

8. Messung magnetischer Eigenschaften

Sauerstoff und Stickoxid sind, im Gegensatz zu anderen Gasen, **paramagnetisch**, d. h., ihre relative Permeabilität ist größer als 1. Als **Suszeptibilität** κ ist die Differenz zwischen der relativen Permeabilität und 1 definiert:

$$\kappa = \mu_{\text{rel}} - 1 \quad (8.1)$$

Wird diese auf die Dichte bezogen, erhält man die **spezifische Suszeptibilität** χ :

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} . \quad (8.2)$$

Beide nehmen für paramagnetische Stoffe mit der Temperatur stark ab, und es gilt das Curiesche Gesetz:

$$\chi = \frac{C}{T} . \quad (8.3)$$

Darin ist C die **Curiesche Konstante** und T die Kelvin-Temperatur. Nachstehend sind einige Werte für χ aufgeführt, angegeben in $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ bei 20°C :

O_2	NO_2	N_2	H_2	CO_2
+1250	+570	-5	-2,3	-5,6

Magnetische Analyseverfahren werden fast nur zur Sauerstoffgehaltsbestimmung verwendet. Dabei wird neben der Suszeptibilität gleichzeitig deren Temperaturabhängigkeit zur Messung ausgenutzt.

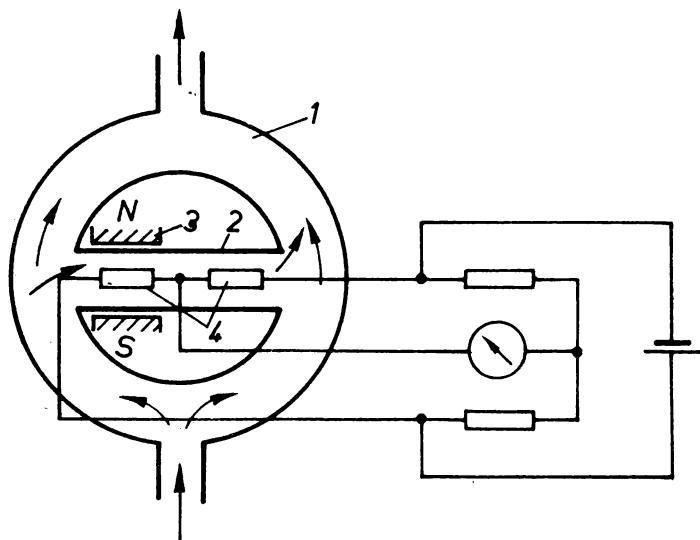


Bild 8.1: Ringmeßkammer zur O_2 -Gehaltsbestimmung
1 Ringrohr; 2 Querverbindung; 3 Magnet; 4 Heizwicklung

Bild 8.1 zeigt das Prinzip der sog. **Ringmeßkammer**. Am linken Teil der Querverbindung des Ringrohres liegt ein starkes Magnetfeld. Eine unterteilte Heizwicklung liegt zur Hälfte in diesem Teil. Das Magnetfeld zieht O₂-Moleküle in die Querverbindung hinein, die sich an der Heizwicklung erwärmen. Damit sinkt aber ihre Suszeptibilität, weshalb sie von neu angezogenen O₂-Molekülen nach rechts verdrängt werden. Diese Strömung heißt **magnetischer Wind** und erhöht die Temperatur im rechten Teil der Verbindung. Beide Heizwicklungen sind Zweige einer Brückenschaltung, die infolge der unterschiedlichen Temperaturen verstimmt sind. Der angezeigte Brückenstrom ist ein Maß für den O₂-Gehalt des Meßgases.

Der Meßbereich kann bis 100 Vol.-% betragen, die Fehlergrenze ist etwa $\pm 3\%$. Außerdem hat das System eine gewisse Totzeit.

9. Messung der Wärmeleitfähigkeit

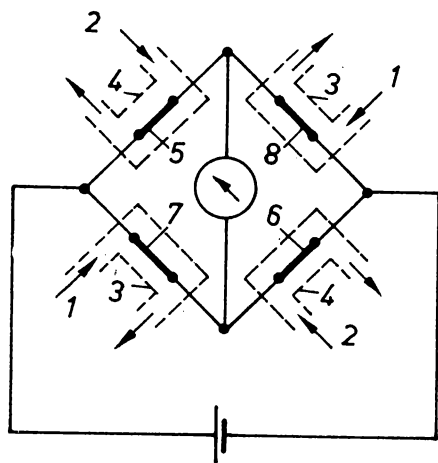
Die Wärmeleitfähigkeit von Gasen und Dämpfen ist unterschiedlich. Sie ist temperaturabhängig und wird vom Wassergehalt beeinflusst, hängt aber nicht vom Druck ab. Gegenüber Luft, O₂ und N₂ haben besonders Wasserstoff und Kohlendioxid eine unterschiedliche **Wärmeleitfähigkeit**, wie folgende Übersicht zeigt (Angabe in $10^{-6} \text{ J cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ bei 0 °C):

Luft	O ₂	N ₂	CO ₂	SO ₂	H ₂
242	244	239	143	84	1760

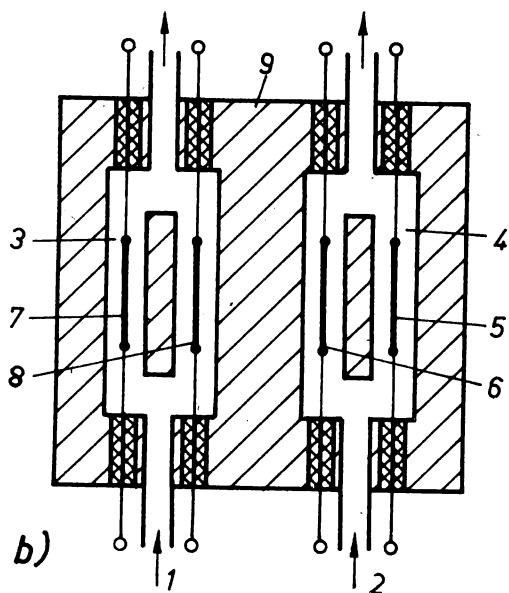
Durch Messung der Wärmeleitung wird vor allem der CO₂-Gehalt, aber auch der an SO₂, NH₃ und H₂ von Gasgemischen bestimmt. Das Prinzip ist einfach. Die Abkühlung von gasumspülten, beheizten Drähten ist von der Wärmeabfuhr durch das Gas abhängig und um so größer, je größer die Wärmeleitfähigkeit des Gases oder Gasgemisches ist. Als Vergleichsgas dient Luft gleicher Temperatur und Feuchte. Meß- und Vergleichsgas werden durch Kammern geleitet, in denen ein Widerstandsdraht ausgedehnt ist, der einen Zweig in einer Brückenschaltung bildet (Bild 9.1).

Wegen der größeren Empfindlichkeit dienen je zwei gegenüberliegende Brückenarme als Meß- und Vergleichsstrecke, die in einem gemeinsamen Metallblock angeordnet sind (Bild 9.1 b)).

Die unterschiedliche Abkühlung der Drähte in den Kammern wird als Widerstandsänderung gemessen und angezeigt. Wegen der nur kleinen Änderungen muß die Anordnung sorgfältig gegen störende Einflüsse geschützt werden. Je nach der zu messenden Komponente kann der Meßbereich 0 ... 2, 0 ... 20 oder auch 0 ... 100 Vol.-% betragen. Die Fehlergrenze beträgt etwa $\pm 2,5\%$ vom Meßbereichsendwert.



a)



b)

Bild 9.1: Wärmeleitfähigkeitsmessung von Gasen

a) Schaltbild; b) Meßkammeraufbau

1 Meßgas; 2 Vergleichsgas (Luft); 3 Meßkammer; 4 Vergleichskammer; 5, 6, 7, 8 Heizdraht; 9 Metallblock

10. Messung der Adsorptionsgeschwindigkeit

Chromatografie hieß ursprünglich eine Methode zur Trennung farbiger Substanzen durch Adsorption an bestimmten porösen Materialien.

A 13. Was ist Adsorption und Absorption?

Der Begriff Chromatografie wird auch zur Bezeichnung eines neuen Analyseverfahrens benutzt, das sich immer mehr durchsetzt. Mit **Gaschromatografen** lassen sich mehrere Komponenten gleichzeitig bestimmen, was mit den bisher beschriebenen Verfahren nicht möglich ist.

Zur chromatografischen Analyse, deren Geräteschema Bild 10.1 zeigt, wird ein Trägergas (He, H₂, auch N₂, CO₂, Ar, Luft) verwendet, das mit einem vorgegebenen Durchsatz (z. B. 4 dm³/h) durch die Apparatur strömt. Nach Passieren der Vergleichskammer eines Wärmeleitfähigkeitsmeßgerätes (siehe Abschnitt 9) strömt es durch eine Trennsäule und nach Passieren der Meßkammer ins Freie. Werden beide Kammern vom gleichen Gas durchströmt, tritt am Brückenausgang bekanntlich kein Signal auf.

Zur Analyse wird dem Trägergas eine dosierte Menge des zu untersuchenden Gasgemisches hinter der Vergleichskammer zugesetzt und mit in die Trennsäule transportiert. Diese besteht aus einem Rohr von 5 ... 6 mm Innendurchmesser und z. T. beträchtlicher Länge (einige Meter), das mit Aktivkohle, Kieselgel, Aluminiumoxid d. ä. als Adsorptionsmittel gefüllt ist. Das Trägergas kann die **Trennsäule** ungehindert passieren, während die Meßkomponenten adsorbiert und wieder desorbiert werden und damit gegen das Trägergas die Trennsäule zeitlich verzögert verlassen.

Im Bild 10.2 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt. Das Meßgas bestehe aus den drei Komponenten A, B und C, die zu Beginn des Analysezyklus ungetrennt in die Trennsäule eintreten. Nach einiger Zeit befindet sich die Komponente mit der geringsten Adsorption vorn (C), während die mit der größten Adsorption (A) verzögert durch die Trennsäule wandert. Am Ausgang sind alle drei Komponenten voneinander getrennt.

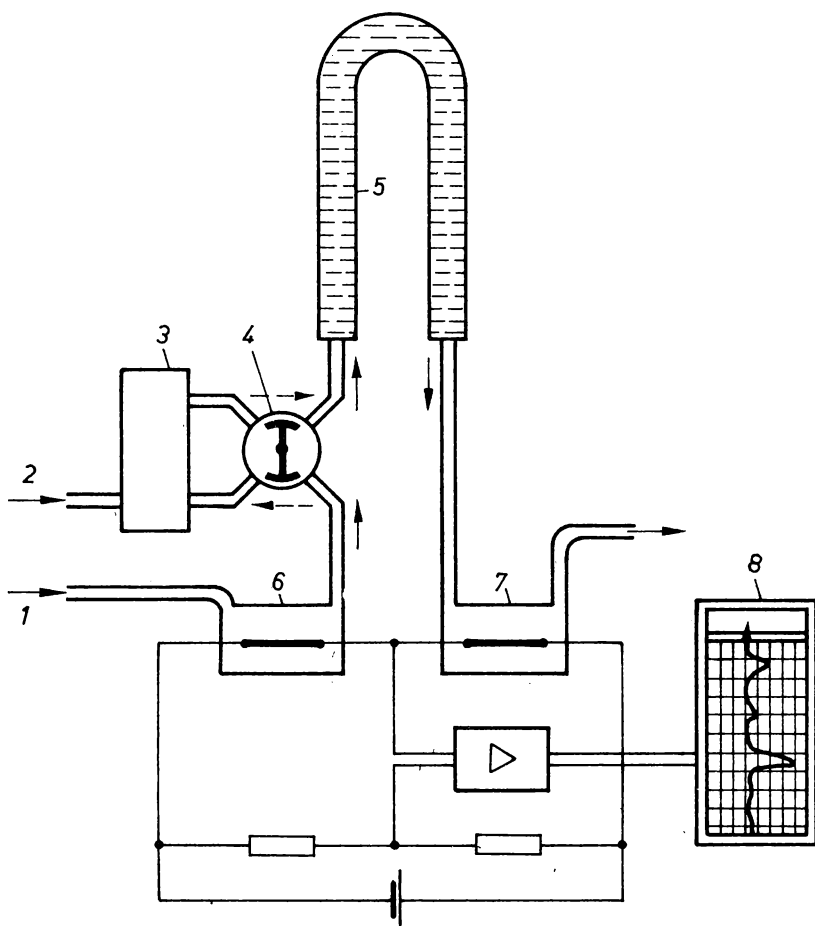


Bild 10.1: Prinzip des Gaschromatografen

1 Trägergas; 2 Meßgas; 3 Dosiervorrichtung; 4 Umschaltventil; 5 Trennsäule; 6 Vergleichskammer; 7 Meßkammer; 8 Kompensationsbandschreiber

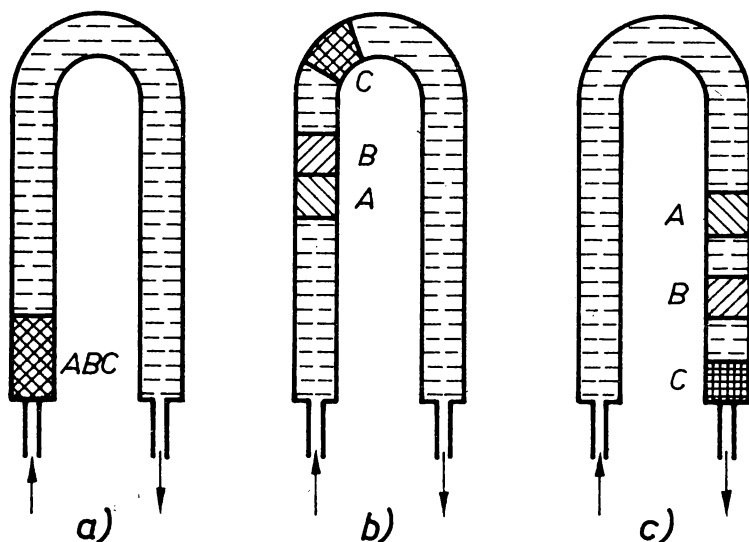


Bild 10.2: Komponententrennung in der Trennsäule

In der Meßkammer verstimmt die verzögerte Komponente kurzzeitig die Meßbrücke, weil sie eine von der des Trägergases abweichende Wärmeleitfähigkeit hat. An die Meßbrücke ist ein Kompensationsschreiber angeschlossen, der in Abhängigkeit von der Zeit das **Chromatogramm** schreibt. Der Zeitmaßstab, d. h. die Verweilzeit in der Trennsäule, charakterisiert die Komponente, während die Amplitude ein Maß für die Konzentration ist (Bild 10.3). Der jeweilige Abbildungsmaßstab wird aus Vergleichswerten bestimmt.

Neben den hier beschriebenen Adsorptionssäulen werden auch solche mit Flüssigkeitsfüllung verwendet. Die Wirkungsweise ist die gleiche.

Die Gaschromatografie ist für fast alle gasförmigen Stoffe brauchbar. Flüssigkeiten sind nach vorhergehender Verdampfung auch analysierbar. Die Genauigkeit kann sehr hoch sein, die Meßzeit liegt zwischen 5 und 30 min je nach Länge und Füllung der Trennsäule.

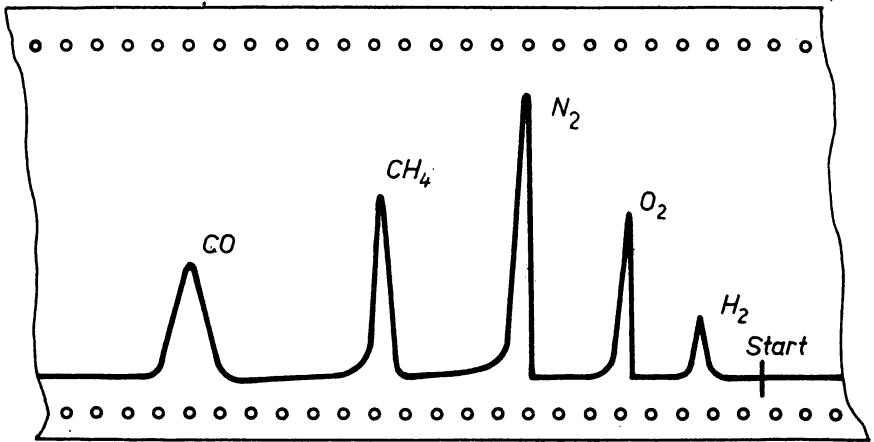


Bild 10.3: Chromatogramm eines Gasgemisches

A 14. Im Gegensatz zu den anderen beschriebenen Analyseverfahren arbeitet ein Gaschromatograf nicht kontinuierlich. Warum wird er trotzdem (und im zunehmenden Maße) zu Analysenmessungen am Prozeß eingesetzt?

11. Messung der Viskosität

Die Viskosität ist eine wesentliche Eigenschaft von Flüssigkeiten. Sie kennzeichnet das Fließverhalten und ist um so größer, je zähflüssiger die jeweilige Substanz ist. In Richtung der Bewegung wirkt eine Schubspannung τ in der Flüssigkeit, die dem senkrecht dazu auftretenden Geschwindigkeitsgradienten proportional ist:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (11.1)$$

Darin ist η ein Proportionalitätsfaktor. Er heißt **dynamische Viskosität** und hat die Einheit $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. In der Praxis wird allerdings häufiger die **kinematische Viskosität** ν verwendet. Das ist die dynamische Viskosität, dividiert durch die Dichte der Flüssigkeit; dadurch entsteht die Einheit m^2s^{-1} :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (11.2)$$

Historisch eingeführt ist die Einheit Stokes; es gilt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ St} &= 100 \text{ cSt}^1) \\ &= 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1} \end{aligned}$$

St Stokes
cSt Zentistokes

A 15. Nennen Sie Bauteile eines Kraftfahrzeuges, für die die Viskosität der dort zum Einsatz kommenden Flüssigkeiten von wesentlicher Bedeutung für die Funktionstüchtigkeit ist!

Die Viskosität bestimmt die Qualität eines Produktes und ist daher oft kontinuierlich zu messen, so z. B. bei der Herstellung von Plasten, Elasten, Farben, Schmierölen usw. Sie ist allerdings für manche makromolekulare Flüssigkeiten keine Konstante und hängt von der Temperatur ab. Bei Viskositätsmessungen erfolgt deshalb eine parallele Temperaturmessung oder eine Thermostatisierung der Meßeinrichtung.

In der Laborpraxis wird vielfach die Fallgeschwindigkeit einer Kugel in der Meßflüssigkeit zur Viskositätsbestimmung ausgenutzt. Für kontinuierliche Messungen ist dieses Prinzip nicht geeignet.

Kontinuierliche Messungen werden entweder mit dem Kapillar-Viskosimeter oder mit einem Rotations-Viskosimeter ausgeführt.

Beim **Kapillar-Viskosimeter** wird die Meßflüssigkeit von einer Pumpe mit konstantem Förderstrom durch eine Kapillare gepreßt (Bild 11.1). Dabei gilt

$$\eta = k \cdot \Delta p, \quad (11.3)$$

worin k eine Konstante ist, in der die Abmessungen des Geräts und der Förderstrom enthalten sind; Δp ist die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kapillare.

1) Laut Anordnung über die Tafel der gesetzlichen Einheiten (GBI. Sonderdruck Nr. 605 vom 1. 3. 1969) ist nur noch die Einheit Zentistokes anzuwenden. Diese Tafel wird demnächst durch TGL 31 548 abgelöst. Danach ist die Einheit Zentistokes ab 1. 1. 1980 nicht mehr zulässig.

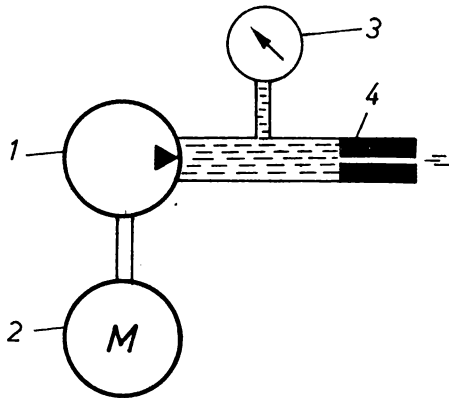


Bild 11.1: Kapillar-Viskosimeter

1 Hydropumpe; 2 Antriebsmotor; 3 Druckmesser; 4 Kapillare

Am häufigsten werden **Rotations-Viskosimeter** verwendet. Im Bild 11.2 ist das Grundprinzip dargestellt.

Durch einen Antriebsmotor (Synchronmotor) wird ein Zylinder mit der zu untersuchenden Flüssigkeit in konstante Umdrehung versetzt. Ein zweiter, coaxial dazu angeordneter Zylinder wird von der Meßflüssigkeit mitgenommen; von der Flüssigkeit wird auf ihn ein Moment übertragen:

$$M = k \cdot \eta \cdot \omega \quad (11.4)$$

- k Konstante
- M Drehmoment an Zylinder 2
- ω Winkelgeschwindigkeit des Zylinders 1

Die Viskositätsmessung wird also auf eine Momentmessung zurückgeführt. Das ist auf einfache Weise mit einer Gegenmomentfeder möglich, wodurch der Ausschlagwinkel des Meßzylinders aus seiner Ruhelage zur Abbildungsgröße wird, oder durch andere, meistens elektrische, Drehmomentmeßverfahren. Charakteristisch für Rotations-Viskosimeter ist der sehr große Meßbereich (z. B. von 0,01 bis 1000 Ns m⁻²). Die Eichung erfolgt meistens mit Hilfe von Vergleichsflüssigkeiten.

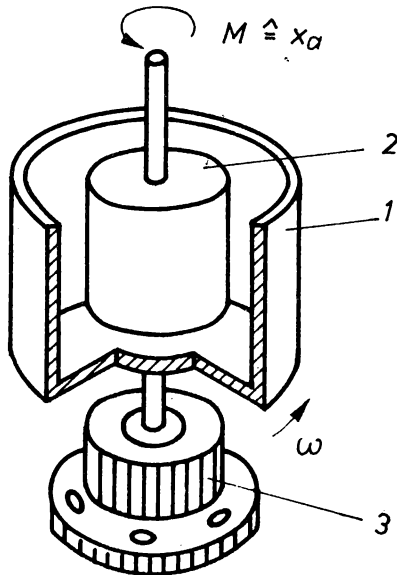


Bild 11.2: Rotations-Viskosimeter

1 rotierender Zylinder; 2 Meßzylinder; 3. Antriebsmotor

A 16. Im Beispiel Bild 11.2 sind rotierende Zylinder als typische Bauteile verwendet worden. Überlegen Sie, welche anderen Meßprinzipien auch denkbar wären (Ergebnis von A 15. mit beachten!)

12. Zusammenfassung zu den Abschnitten 5 bis 11 .

Der pH-Wert ist ein Maß für die Stärke einer Säure oder einer Base. Beim Eintauchen von Meßelektroden in die Flüssigkeit ergeben sich vom pH-Wert abhängige Potentiale. Dieser Vorgang wird für die pH-Wert-Messung genutzt.

Die elektrische Leitfähigkeit einer Lösung ist von deren Salzgehalt abhängig. Deshalb kann die Bestimmung desselben auf eine Widerstandsmessung zurückgeführt werden. Als Meßschaltung findet eine Brückenschaltung mit Wechselspannungsquelle Verwendung.

Infrarotes Licht wird durch nichtelementare Gase absorbiert. Auf dieser physikalischen Erscheinung beruht die Wirkungsweise eines nichtdispersen Spektrometers (Infrarot-Gasanalysator). Andere Systeme zur Bestimmung optischer Stoffeigenschaften sind Kolorimeter und Polarimeter.

Zur Bestimmung der Zusammensetzung von Gasen können magnetische Analyseverfahren angewendet werden. Als Meßwandler sind dafür Ringmeßkammern verfügbar. Ihr Wirkungsprinzip beruht auf den paramagnetischen Eigenschaften von Sauerstoff und Stickoxid.

Wärmeleitfähigkeits-Meßkammern sind als Umformglieder in verschiedenen Analysegeräten enthalten. Mit ihrer Hilfe können der CO_2 -Gehalt, der Gehalt an SO_2 , NH_3 und H_2 von Gasgemischen bestimmt werden.

A 17. Warum wird die Wärmeleitfähigkeitsmessung als Vergleichsverfahren ausgeführt?

Mit Hilfe von Gaschromatografen lassen sich mehrere Komponenten eines Gasgemisches gleichzeitig bestimmen. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Komponententrennung in einer Trennsäule und dem Vergleich der Wärmeleitfähigkeit der Komponenten mit der eines definierten Trägergases.

Die kontinuierliche Messung der Viskosität ist mit Hilfe von Kapillar- und Rotationsviskosimetern möglich. Bei Laborversuchen kann die Fallgeschwindigkeit einer Kugel in der Meßflüssigkeit zur Viskositätsbestimmung ausgenutzt werden.

Lösungen der Aufgaben

A 1. a) Feste Körper in Gas: Staubgehalt (Industrie allgemein, Umweltschutz)

b) Festkörper in Festkörper: Legierungen (Metallurgie)

c) Feste Körper in Flüssigkeit: Suspensionen (Lebensmittelindustrie, Umweltschutz)

A 2. Gas in Gas; Flüssigkeit in Flüssigkeit (wäßrige Lösungen); Flüssigkeit in Festkörper (hygroskopische Stoffe)

$$\mathbf{A\ 3.} \quad C = C_{\text{Luft}} + C_{\text{Wasser}} + C_{\text{Trock.}} \quad (2.25)$$

mit

$$C_{\text{Luft}} = \epsilon_o \cdot \frac{A_L}{s} \quad ,$$

$$C_{\text{Wasser}} = \epsilon_{rW} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A_W}{s} \quad ,$$

$$C_{\text{Trock.}} = \epsilon_{rTr.} \cdot \frac{A_{Tr.}}{s} \quad .$$

$$\mathbf{A\ 4.} \quad C = \epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot C_o = \epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A}{s}$$

$$\text{mit } A = A_L + A_W + A_{Tr}$$

$$C = \epsilon_o \cdot \frac{A_L}{s} + \epsilon_{rW} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A_W}{s} + \epsilon_{rTr} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A_{Tr}}{s}$$

$$\epsilon_{r_{\text{res}}} \cdot \epsilon_o \frac{A}{s} = \epsilon_o \cdot \frac{A_L}{s} + \epsilon_{rW} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A_W}{s} + \epsilon_{rTr} \cdot \epsilon_o \cdot \frac{A_{Tr}}{s}$$

$$\epsilon_{r_{\text{res}}} = \frac{1}{A} (A_L + \epsilon_{rW} \cdot A_W + \epsilon_{rTr} \cdot A_{Tr}) \quad (2.26)$$

=====

A 5. }
A 6. } Die Antworten sind dem vorliegenden Lehrstoff zu entnehmen.
A 7. }

- A 8.** Die absolute Feuchte Φ ist gleich der in der Volumeneinheit eines Stoffes enthaltenen Wassermasse.

$$\Phi = \frac{m_W}{V} = \frac{\rho_W \cdot V_W}{V}$$

Das konstante Gesamtvolumen V des Stoffes soll sich aus dem Volumen des Wassers V_W und dem des trockenen Stoffes V_{Tr} zusammensetzen:

$$V = V_W + V_{Tr}$$

Für den Fall eines Meßkondensators nach Bild 2.4 b) und der Annahme eines vernachlässigbaren Luftvolumens gilt:

$$V = A \cdot s, \quad V_W = A_W \cdot s, \quad V_{Tr} = A_{Tr} \cdot s$$

Damit ist

$$\Phi = \frac{\rho_W \cdot A_W \cdot s}{V} = \frac{\rho_W \cdot A_W \cdot s}{A \cdot s} = \rho_W \frac{A_W}{A}$$

und für die resultierende relative Dielektrizitätskonstante nach Gl. (2.26)

$$\epsilon_{r_{res}} = \frac{1}{A} (\epsilon_{r_W} \cdot A_W + \epsilon_{r_{Tr}} \cdot A_{Tr})$$

$$\text{mit } A_W = \frac{A \cdot \Phi}{\rho_W}$$

$$\epsilon_{r_{res}} = \frac{1}{A} \left(\epsilon_{r_W} \cdot \frac{A \cdot \Phi}{\rho_W} + \epsilon_{r_{Tr}} \cdot A_{Tr} \right)$$

=====

A 9.

A 10.

A 11.

Die Antworten sind dem vorliegenden Lehrstoff zu entnehmen.

A 12. Thermoelement

A 13. Adsorption: Anlagerung von Gasen und gelösten Stoffen an Phasengrenzflächen;

Absorption: Eindringen von Gasen oder Gasgemischen in eine kondensierte Phase (Flüssigkeit, fester Körper).

A 14. Mit einem Gerät können in einem Meßvorgang mehrere Komponenten bestimmt werden.

- A 15.** Verbrennungsmotor: Schmieröl (Sommer/Winter);
 Stoßdämpfer: Dämpfungsflüssigkeit (irreversible Energieformwandlung)
- A 16.** Bedämpfung einer erzwungenen Schwingung (schwingender Körper in der Meßflüssigkeit)
- A 17.** Vergleich der gesuchten Eigenschaft mit der bekannten Eigenschaft eines zweiten Meßobjektes (hier: Luft)

Stoffeigenschaft	Meßverfahren	wesentliches Umformglied	Abbildungsgröße; Kombination Kennwerte von Aggregatzuständen bei der Messung
Feuchte	Psychrometer (Ausnutzung der Verdunstungskälte)	Widerstandsthermometer, Thermobatterie	elektrische Spannung $F_{\text{rel}} \approx 3 \%$
	Hygrometer (Ausnutzung des Dampfdruckes über Lösungen)	spezielle Meßfühler mit Widerstandsthermometer	elektrische Spannung $F_{\text{rel}} \approx 2 \%$
	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit o. Dielektrizitätskonstanten	Meßbrücke	elektrische Spannung
Dichte	Auftrieb in Flüssigkeiten oder Gasen	Auftriebskörper	Weg (Winkel)
	Intensitätsänderung von Gammastrahlen	Zählrohr oder Ionisationskammer	Impulszahl; bes. für zähe u. aggressive Medien u. bei hohen Temperaturen und Drücken; $F_{\text{rel}} \approx 2 \%$

Tafel 1: Übersicht über Verfahren zur Messung von Stoffeigenschaften (Blatt 1)

Stoffeigenschaft	Meßverfahren	wesentliches Umformglied	Abbildungsgröße; Kombination Kennwerte von Aggregatzuständen bei der Messung
elektrische Leitfähigkeit	Widerstandsmessung	Meßbrücke	elektrische Spannung
Zusammensetzung	Wärmeleitfähigkeitsmessung (CO ₂ , SO ₂ , NH ₃ , H ₂)	spezielle Meßkammer in Brückenschaltung	elektrische Spannung $F_{\text{rel}} \approx 2 \%$
	Absorption von Infrarot (CO, CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ , C ₂ H ₆)	Absorptionskammern mit Membrankondensator	Kapazitätsänderung (elektrische Spannung); $F_{\text{rel}} \approx 3 \%$
	Paramagnetismus von O ₂ und NO ₂	Ringmeßkammer in Brückenschaltung	elektrische Spannung $F_{\text{rel}} \approx 3 \%$
	Chromatografie (Adsorption, Desorption)	Trennsäule, Wärmeleitfähigkeits-Meßkammer	elektrische Spannung Meßzeit 5 ... 30 min
Viskosität	Ausnutzung des Strömungswiderstandes	Kapillare; bewegte Körper in Flüssigkeit	Druckdifferenz; Fallgeschwindigkeit; Kraft bzw. Moment
Heizwert	Kalorimeter (Temperaturerhöhung bei Verbrennung)	Temperatur-Meßfühler	Temperatur; überwiegend Laborverfahren
pH-Wert	Messung von Potentialdifferenzen	Spezial-elektroden	elektrische Spannung, Unsicherheit: $\pm 0,005 \text{ pH}$

Tafel 1: Übersicht über Verfahren zur Messung von Stoffeigenschaften (Blatt 2)

Sachwortverzeichnis

Adsorptionsgeschwindigkeit	37	pH-Wert	27
Auftrieb, hydrostatischer	25	Polarimeter	33
Bande	31	Psychrometer	12
Chromatografie	37	Ringmeßkammer	34
Chromatogramm	39	Rotations-Viskosimeter	42
Curiesche Konstante	34	Suszeptibilität	33
Dichtemessung	22	Taupunkthygrometer	11
Eigenschaften, magnetische	33	Taupunkttemperatur	7
optische	31	Trennsäule	37
Einteilung nach Aggregatzuständen	1	Trockengehalt	9
Feuchte, absolute	6	Verbrennungswärme	19
relative	8	Verfahren, dielektrische	15
Feuchtegrad	6	Vergleichsverfahren	4; 33
Filterung, negative	31	Viskosität, dynamische	41
positive	31	kinematische	41
Gaschromatograf	37	Wägeprinzip	24
Gaskonstante, allgemeine	5	Wärmeleitfähigkeit	35
technische	5	Wasseranteil in Feststoffen	8
Gleichstromleitfähigkeitsverfahren	14	Wind, magnetischer	35
Heizwert	20	Wobbezahl	21
Infrarot-Gasanalyator	32	Zustandsgleichung	5
Kapillar-Viskosimeter	41		
Kolorimeter	33		
Leitfähigkeit, elektrische	29		
Lithiumhydroxid-Taupunktmeßfühler	9		
Meßverfahren, chemische	3		
physikalische	3		
physikalisch-chemische	3		
Nernstkonstante	27		

Als Manuskript gedruckt · Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlicht:

**INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
Karl-Marx-Stadt**

Druck:

**ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU**

Ag 613/4163/83/600

2. Ausgabe 4. Auflage

Vorzugsschutzgebühr: 2,00 M